

Qué nos enseña la extinción de los dinosaurios sobre la historia de la vida y de la Tierra

What is the contribution of the dinosaur extinction about the history of the life on the earth

JOSÉ IGNACIO CANUDO

Grupo Aragosaurus-IUCA (<http://www.aragosaurus.com>). Paleontología. Facultad de Ciencias. Universidad de Zaragoza. 50009 Zaragoza. C/ e: jicanudo@unizar.es

Resumen La extinción de los dinosaurios no avianos en el límite Cretácico-Terciario es uno de los temas de investigación más populares. Posiblemente, la razón se deba a la singularidad de los acontecimientos alrededor de la extinción de los animales más famosos de la historia de la vida. Durante un pequeño intervalo al final del Cretácico se produjeron una serie de fenómenos que desestabilizaron y incluso destruyeron muchos ecosistemas terrestres. Una inusitada actividad volcánica y el impacto de un gran meteorito son las dos principales causas aceptadas como los agentes asesinos de los dinosaurios. Sin embargo, la escasez de registro de dinosaurios a nivel mundial al final del Cretácico dificulta cuantificar cuál es la importancia de cada uno de estos fenómenos. La causa volcánica se ha relacionado con una extinción más dilatada en el tiempo, y la causa extraterrestre con una extinción instantánea. Obviamente, ambos procesos no son excluyentes y un modelo que los integre posiblemente sea el más adecuado. La información disponible indica que la extinción fue compleja; por una parte culminó un proceso de pérdida de biodiversidad comenzado en el Campaniense; por otra, los efectos catastróficos de un impacto de un meteorito pudieron acelerar ese proceso, produciéndose la extinción de los últimos dinosaurios no avianos unos miles de años después del impacto.

Palabras clave: Dinosaurios, límite K/T, extinción, impacto extraterrestre, volcanismo

Abstract *The extinction of the non-avian dinosaurs at the Cretaceous-Tertiary Boundary is one of the most popular research subjects. This is possibly due to the uniqueness of the events surrounding the extinction of the most famous animals in the history of life. During a small interval at the end of the Cretaceous a series of phenomena took place that destabilized and even destroyed a great number of terrestrial ecosystems. An unusual level of volcanic activity and the impact of a large meteorite are the two main causes accepted as responsible for the wiping out of the dinosaurs. However, the worldwide scarcity of the dinosaur record at the end of the Cretaceous makes it difficult to quantify the relative importance of each of these phenomena. Volcanic activity has been associated with an extinction that is more protracted in time, and the extraterrestrial impact with an instantaneous extinction. Even so, the two processes are not mutually exclusive, and a model incorporating them both is perhaps most suitable for explaining the fossil record. The information available indicates that the extinction of the dinosaurs was complex. On the one hand, it was the culmination of a gradual loss of biodiversity that had begun in the Campanian. On the other hand, the catastrophic effects of a meteorite impact might have accelerated this process, with the extinction of the final non-avian dinosaurs occurring a few thousand years after the impact.*

Keywords: *Dinosaurs, K/T boundary, extinction, extraterrestrial impact, vulcanism, sustainability.*

INTRODUCCIÓN

Este número monográfico pretende subrayar las interacciones entre la vida y la Tierra, de mane-

ra que nos ayuden a entender mejor cómo funciona el planeta. Geología y Biología están más cercanas de lo que un planteamiento simplista indica. Esta relación, o por qué no decirlo, la continuidad entre

lo orgánico y lo inorgánico, es una idea presente desde los primeros naturalistas. Por algo se engloban las dos ciencias en las Ciencias Naturales. Si esta contribución la escribiera un astrofísico, que no es el caso, nos resaltaría cómo el hierro presente en la hemoglobina de cualquiera de nosotros se sintetizó en el interior de una estrella desintegrada hace miles de millones de años. La mayoría de los elementos que conforman las moléculas orgánicas están sintetizados de esta manera, por tanto desde un punto de vista de nuestro astrofísico el inicio del camino hasta llegar a la vida tal y como la conocemos habría que ponerlo en ese lejano punto de una estrella. Pero resulta más cercano buscar esa relación en algo más próximo como es un acontecimiento singular de la Tierra y las consecuencias que pudo tener en la vida.

Uno de los mejores ejemplos para entender la relación entre Gea y los organismos que viven en ella es la extinción del límite Cretácico-Paleógeno. El Cretácico es un período de la historia de la Tierra especialmente rico en biodiversidad, su final coincide con una crisis ecológica sin precedentes en el Mesozoico (incluyendo la extinción de los dinosaurios) y una serie de acontecimientos geológicos excepcionales. El límite entre el Cretácico y el Paleógeno suele aparecer en la literatura como K/T. La letra K es el comienzo de la palabra alemana *Kreidezeit*, que significa el tiempo de la creta. La letra T significa Terciario. Es un término informal que abarcaría un intervalo temporal más amplio que Paleógeno. En este trabajo se va a utilizar el acrónimo K/T (Cretácico-Terciario) para referirnos al límite Cretácico-Paleógeno.

El planteamiento inicial, "la extinción de los dinosaurios", es en parte incorrecto. Los estudios modernos han demostrado que las Aves son un grupo de dinosaurios (Sanz, 1999), y por tanto los dinosaurios no se extinguieron en el límite (Fig.1). Cuando los investigadores hablamos de la extinción de los dinosaurios nos referimos exclusivamente a la que sufrieron ornitisquios y saurisquios no avianos. La máquina de la evolución trabaja deprisa y el cambio orgánico puede producir estas paradojas, nuestros pequeños gorriones o los bellos flamencos son la evidencia viva de la existencia de animales tan fantásticos como los grandes saurópodos extinguidos hace 65 m.a. Ni el mejor escritor de ciencia ficción podría haberlo imaginado.

La causas de la extinción en general, y de los dinosaurios en el límite Cretácico-Terciario, en particular, es uno de los debates más enriquecedores de la ciencia. Dos son las razones: una es más científica, ya que se trata de una investigación que debe ser abordada desde múltiples disciplinas; esto permite la colaboración de investigadores tan aparentemente alejados como un astrofísico, un químico y un paleontólogo. La segunda razón es



Fig. 1. Las aves son dinosaurios que no se extinguieron en el límite Cretácico-Terciario, en la actualidad son unos de los vertebrados más abundantes y diversos. En la fotografía una golondrina (*Hirundo rustica*).

más popular, si algo pudo extinguir a unos colosos como los dinosaurios que dominaron la Tierra durante más de 200 m.a., también podría hacerlo con nosotros... Recientemente un amplio equipo internacional ha realizado una revisión de las pistas que dejó uno de esos excepcionales acontecimientos como es la caída de un meteorito justo en el límite (Schulte *et al.*, 2010). Relacionar directamente la extinción de los dinosaurios con el impacto de un objeto extraterrestre es la teoría con más seguidores en la actualidad (Fig. 2). Se trata del escenario más atractivo aunque carecemos de pruebas directas como explicaremos más adelante. Sin duda, este atractivo ha favorecido el gran esfuerzo a nivel mundial por buscar pruebas, y un conocimiento de los últimos millones de años del Cretácico como de ningún otro intervalo de la historia terrestre. En esta contribución se pretende explicar de manera simple los datos de la extinción de los dinosaurios desde diferentes puntos de vista, el histórico, el del registro fósil conocido y las evidencias que relacionen los eventos del final del Cretácico con dicho registro.

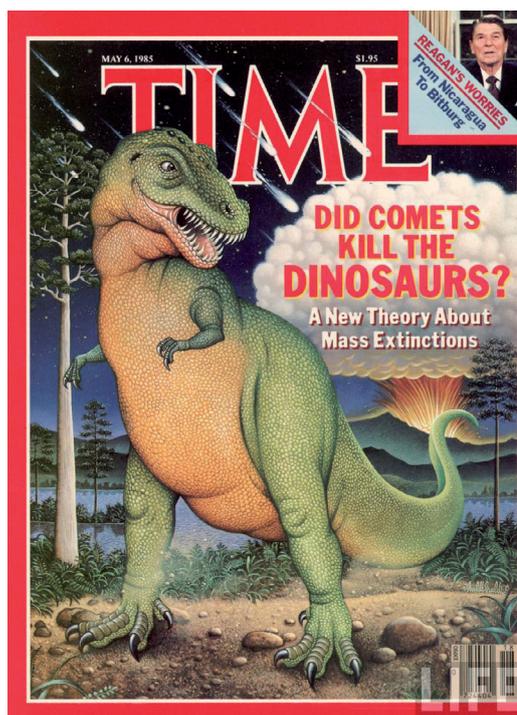


Fig. 2. Portada del 6 de Mayo de 1985 de la revista norteamericana *Time*. La extinción de los dinosaurios por un impacto extraterrestre le quita la primera página a Ronald Reagan.

UNA VISIÓN HISTÓRICA DE LA EXTINCIÓN DE LOS DINOSAURIOS

Primeras ideas de la extinción del límite Cretácico-Terciario

Las primeras teorías para explicar los cambios faunísticos entre el Cretácico-Terciario se propusieron al comienzo del siglo XIX. El padre de la Paleontología de vertebrados Georges Cuvier (Fig. 3) fue el primero en proponer una teoría para explicar el relevo de los vertebrados entre el Cretácico y el Terciario. Su hipótesis catastrofista relacionaba los cambios faunísticos con entradas y retiradas del mar en el continente. Sus catástrofes tendrían una escala regional, de manera que los vertebrados migrarían hacia zonas más favorables cuando el nivel del mar variaba. Su hipótesis estaba bien fundamentada teniendo en cuenta el conocimiento de la época; se habían descubierto vertebrados marinos en las rocas del Jurásico y el Cretácico. Sin embargo, en el Terciario únicamente se habían encontrado vertebrados terrestres como los mamíferos.

Las grandes diferencias entre estos primeros catastrofistas para explicar las extinciones se debían a la religión. Un buen ejemplo son las polémicas entre Cuvier y el reverendo inglés Buckland. Para este último, las inundaciones habrían afectado a toda la tierra y no sólo a algunas áreas. Se basaba en sus estudios sobre vertebrados pleistocenos. Esos huesos eran la prueba de una gran catástrofe (diluvio universal) mundial. El conocimiento paleontológico aumentó en las primeras décadas del siglo XIX y una de las consecuencias es que se necesitaban más catástrofes para explicar el registro fósil observado. En el año 1849 ya se proponían, al menos, 29 catástrofes separadas

Fig. 3. Retrato de Georges Cuvier, considerado el padre de la Paleontología de vertebrados. Además fue el primer investigador que propuso una teoría para explicar el cambio de faunas de vertebrados entre el Cretácico y el Terciario.



cada una de ellas por un límite estratigráfico. Para explicar estas catástrofes, Buckland proponía cambios bruscos del clima producidos por una variación de la inclinación del eje de la Tierra, la aproximación de un cometa u otras causas astronómicas. Estas intuitivas hipótesis se adelantaron casi 100 años al momento en que pudieron ser formuladas con cierta sustentación.

Primeras propuestas sobre la extinción de los dinosaurios

Owen en 1842 definió Dinosauria como un nuevo grupo de vertebrados. Agrupó en este orden a “reptiles” descritos anteriormente en el Mesozoico de Inglaterra que no encajaban en otros órdenes. Al definir Dinosauria, Owen pretendía añadir argumentos a la interpretación del progreso de la vida, un importante debate científico de mitad del siglo XIX. A partir de autores del siglo XVIII como Buffon y Lamarck se interpretaba que la vida avanzaba hacia una mayor complejidad. Sin embargo, Owen era contrario a esa tendencia de la vida hacia la complejidad, y los dinosaurios representaban un buen ejemplo. Para Owen, los dinosaurios estaban más adaptados a la vida terrestre que los reptiles actuales y tenían sangre caliente. Los cocodrilos y las tortugas actuales representarían la degeneración de los reptiles (dinosaurios) que vivieron en el pasado. En esta misma línea, Owen argumentaba que el Creador situó a los dinosaurios en el Mesozoico porque había diferentes condiciones atmosféricas y menor cantidad de oxígeno que en la actualidad. Como el resto de los reptiles, los dinosaurios tendrían unas tasas metabólicas más bajas que los mamíferos y podrían sobrevivir en esa atmósfera. Al aumentar la cantidad de oxígeno de manera paulatina, las condiciones para la vida serían imposibles para estos reptiles. De alguna manera se puede considerar como una de las primeras hipótesis para explicar su extinción.

El siglo XX

Entre 1920 y 1970 se propusieron numerosas hipótesis para explicar la extinción de los dinosaurios, algunas de las cuales se pueden encontrar en libros de divulgación o incluso de texto. Al comienzo del siglo, las ideas sobre la senilidad racial tuvieron una gran repercusión. La presencia de cuernos o la ausencia de dientes en algunos dinosaurios del Cretácico Superior serían pruebas de esta senilidad. Estas ideas fueron desmontadas por los neodarwinistas en la década de 1930. La idea de senilidad suponía que los dinosaurios eran seres inferiores, o incluso monstruos, en una pirámide en la cual los mamíferos serían el techo de la evolución.

Además de estas ideas antropocéntricas, al comienzo del siglo XX hubo autores que adelantaron hipótesis más o menos interesantes. El Barón Franz

Nopcsa propuso diversos factores bióticos de los dinosaurios para explicar la extinción, como la disminución de su actividad sexual, la escasez de alimentos o su desmesurado tamaño. Otros autores propusieron factores bióticos del ecosistema, así William Diller Matthew apuntó el reemplazamiento gradual de los dinosaurios por parte de los mamíferos. Teorías y/o hipótesis como el vulcanismo o que los mamíferos se comían los huevos de los dinosaurios son estos años.

La mayor parte de las ideas sobre la extinción de los dinosaurios habían sido propuestas ya antes de 1970 pero sin datos, basándose en intuiciones. Según Benton (1990) es a partir de esta década cuando se comienza la investigación rigurosa al relacionar registro fósil, geoquímica, sedimentología y extinciones marinas y continentales.

ESTADO ACTUAL DE LAS TEORÍAS SOBRE LA EXTINCIÓN

Se han propuesto casi un centenar de teorías y/o hipótesis para explicar la extinción de los dinosaurios. Se pueden dividir en las producidas por causas bióticas o por causas físicas (incluyendo las terrestres y las extraterrestres). Se escapa de este trabajo hacer una exhaustiva revisión, pero los más interesados pueden consultar algunas recopilaciones (Benton 1990; Canudo, 2005). Muchas de las hipótesis sobre la extinción de los dinosaurios son meras conjeturas difícilmente comprobables sin sustento en la observación de los datos del registro fósil y la geología. Se trata, a veces, de conjeturas absurdas que únicamente aportan ruido, como la extinción por el SIDA, o la extracción de la Luna del Pacífico.

Otras son contrarias al registro fósil conocido, como considerar el tamaño una degeneración evolutiva. La mejor prueba es que los grandes saurópodos estaban presentes en el Jurásico, 100 m.a. antes de su extinción. De hecho los más grandes no se encuentran al final del Cretácico sino muchos millones de años antes. Lo mismo se podría considerar de la competencia con los mamíferos. Los primeros representantes de estos dos grupos evolucionaron en el Triásico y compartieron ecosistemas durante todo del Mesozoico.

Otras hipótesis son difíciles de comprobar, como la posible relación del sexo de los dinosaurios y temperatura ambiental y sus consecuencias en la extinción. Según esta propuesta, el sexo en los dinosaurios estaría controlado por la temperatura de incubación como sucede en los actuales cocodrilos y tortugas (Paladino *et al.*, 1989). Las perturbaciones climáticas del final del Mastrichtiense pudieron producir poblaciones de dinosaurios con un único sexo y esto causaría su extinción. Es una hipótesis sugerente pero difícil

de contrastar en el registro fósil, como refutación está que la temperatura de incubación carece de importancia en el control del sexo de los dinosaurios avianos actuales.

En la actualidad, está bien aceptado que la causa de la extinción de los dinosaurios fue un cambio climático con todas sus consecuencias. La discusión se plantea sobre el mecanismo que puso en marcha este cambio, bien un vulcanismo masivo o bien un impacto meteorítico. Aunque ambos coinciden en el tiempo, su importancia relativa o absoluta para la inestabilidad y destrucción de la vida es objeto de debate. El núcleo del problema es conocer la velocidad de la extinción: ¿durante miles de años o instantánea? En el centro de la discusión se encuentra el viejo enfrentamiento entre la escuela gradualista y catastrofista. Sin embargo, no se trata de situarnos en uno de los dos lados de la balanza e interpretar los datos según el "bando". Como en cualquier otra investigación científica debemos buscar el modelo que más datos pueda explicar y sobre todo, que no entre en contradicción con las informaciones ya contrastadas.

Antes de analizar los datos sobre la extinción de los dinosaurios es necesario fijar un punto interesante sobre las causas reales de una extinción. Así, el bucardo era una subespecie de *Capra hispanica* recientemente extinguida. El último ejemplar vivo era una hembra del Parque Nacional de Ordesa (Huesca). Este animal murió durante una tormenta invernal por el aplastamiento producido por la caída de un abeto. De manera estricta, tendríamos que considerar que la causa de extinción del bucardo fue la caída de los abetos. Sin duda es una afirmación absurda; antes de quedar un único ejemplar han tenido que darse una serie de factores, como una caza excesiva, o la fragmentación del hábitat causantes de una reducción de individuos hasta que la especie resultó inviable. Estos factores son los verdaderos agentes "asesinos" del bucardo y no la caída de los abetos. Por tanto, debemos diferenciar "el abeto del bucardo" de las verdaderas causas de la extinción (Canudo, 2005). Vamos a discutir cuáles son los agentes asesinos más probables en la extinción de los dinosaurios y del resto de microorganismos, invertebrados y vertebrados que se extinguieron con ellos, y cuáles serían sus consecuencias:

- Una extinción instantánea producida por un impacto extraterrestre de gran magnitud.
- Una extinción rápida geológicamente hablando, pero gradual, producida por la contaminación y el cambio climático consecuencia del intenso vulcanismo.
- Una extinción pluricausal debida a un cambio climático a nivel global. Los efectos a largo plazo como las variaciones eustáticas y el vulcanismo producirían un desequilibrio de los ecosistemas. El impacto sería un efecto añadido.

EXTINCIÓN CATASTRÓFICA A CORTO PLAZO: EL IMPACTO METEORÍTICO

Alvarez *et al.* (1980) trabajando en una sección estratigráfica cerca de Gubbio (Italia) y el paleontólogo holandés Jan Smit en el sureste de España propusieron que la extinción de los dinosaurios fue debida a un impacto extraterrestre. Estos investigadores descubrieron una concentración anormalmente elevada de Iridio coincidiendo con la extinción de foraminíferos planctónicos que marcaba el límite Cretácico-Terciario (Fig. 4). En Gubbio aflora

Fig. 4 (arriba). Sección del corte Cretácico-Terciario en Gubbio (Italia). Se pueden observar los grandes foraminíferos planctónicos del final del Cretácico. Por encima se encuentra la arcilla del límite prácticamente azoica. Los pequeños foraminíferos planctónicos de la base del Terciario se sitúan inmediatamente por encima de la arcilla del límite.

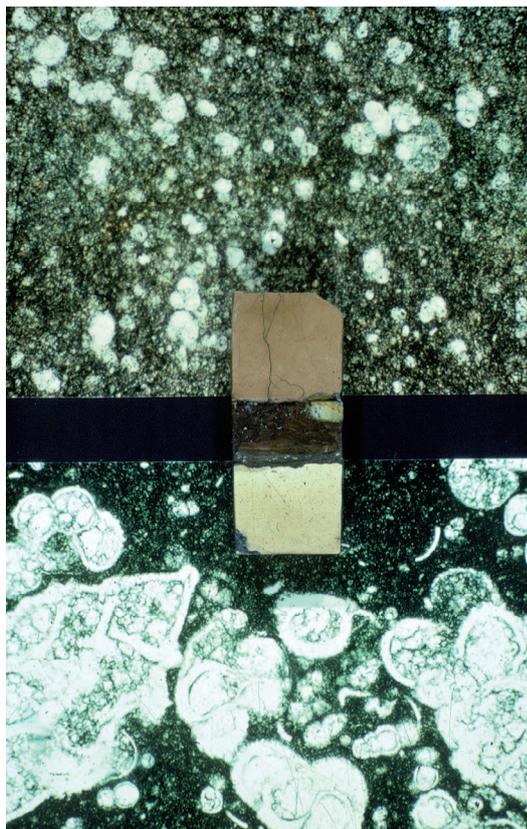
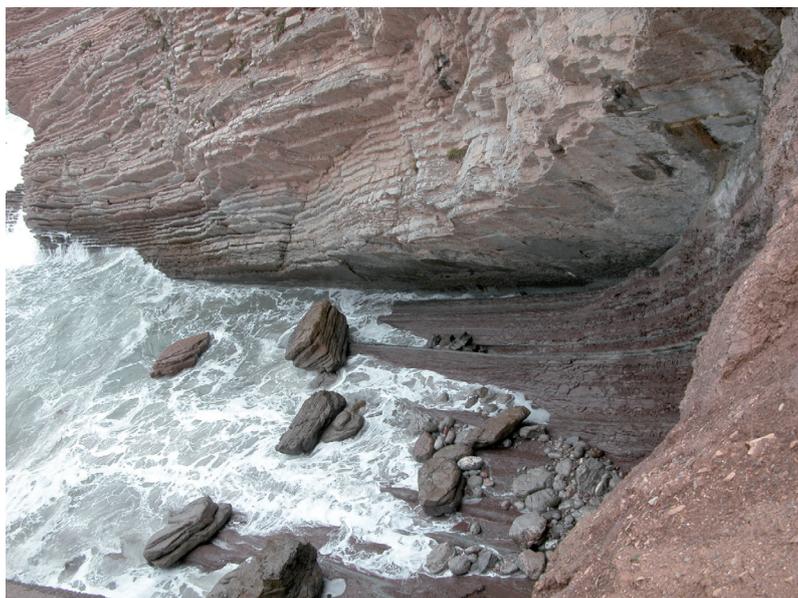


Fig. 5 (abajo). Vista del límite Cretácico-Terciario en Zumaya (Guipúzcoa). Este corte es clásico para el estudio del límite, al haberse encontrado evidencias (incluido el Iridio) del impacto meteorítico. Los niveles estratificados de mayor resalte son del Terciario inferior. El límite se encuentra en la base de estos niveles. En la fotografía queda parcialmente cubierto por el agua.



una potente secuencia de sedimentos marinos profundos depositados de una manera continua durante del Cretácico Superior y el Terciario inferior. El equipo de Alvarez estaba buscando un método para conocer las tasas de sedimentación a partir del contenido de Iridio. Su planteamiento era sencillo, el Iridio se encuentra en la corteza terrestre debido a la caída continua proveniente del espacio. Si en los sedimentos de Gubbio había alguna concentración anómala significaba la presencia de un hiato sedimentario. La sorpresa fue cuando se descubrió que la concentración en el límite era unas 30 veces mayor que las rocas precedentes. Esta extraordinaria concentración solo podía explicarse por un enriquecimiento debido a un impacto extraterrestre.

Cuando se planteó esta hipótesis había pocos datos que la sustentaran, pero en los siguientes años se fueron apilando nuevas evidencias. Además de encontrar el Nivel de Iridio a escala global, coincidiendo con él se descubrieron cuarzos de choque, microtectitas, espinelas ricas en níquel, microdiamantes y aminoácidos extraterrestres (Fig. 5, Smit, 1999). Con todos estos datos se ha calculado que el impacto podría generar una explosión miles de veces más poderosa que la que producirían todas las armas nucleares del mundo. El impacto vaporizaría el meteorito y el área circundante, formando un gran cráter. La teoría consiguió un gran espaldarazo cuando se encontró el cráter en Chicxulub, en la península del Yucatán, en México (Hildebrand *et al.*, 1991). Para muchos autores este cráter es el del límite; su situación geográfica es la que mejor explica el registro geoquímico y sedimentario. Dada la violencia del impacto, el hábitat costero quedaría destrozado por los tsunamis, lo que explicaría la presencia de un sedimento caótico en varias partes del Golfo de México interpretado como resultado directo del impacto (ver referencias en Schulte *et al.*, 2010).

Los defensores de un impacto de esta violencia apuntan que provocaría la devastación global de la biosfera. Algunos de los efectos serían: 1) Una gran onda de choque al llegar a la atmósfera y una devastadora bola de fuego asociada a ella. 2) Incendios a nivel global producidos por la radiación termal inducida durante el impacto. Estos fuegos consumirían el oxígeno y “envenenarían” la atmósfera con dióxido de carbono. 3) Expulsión de una gran cantidad de material de suspensión a la atmósfera, obscureciendo los cielos y produciendo una ruptura de la fotosíntesis. 4) Lluvia ácida que causaría una disminución de la alcalinidad de la superficie marina. La lluvia ácida aumentaría la acidez de los océanos y destruiría a los microorganismos de la parte superior de la columna de agua. Esto produciría el colapso de las cadenas alimenticias y la extinción de muchos organismos marinos.

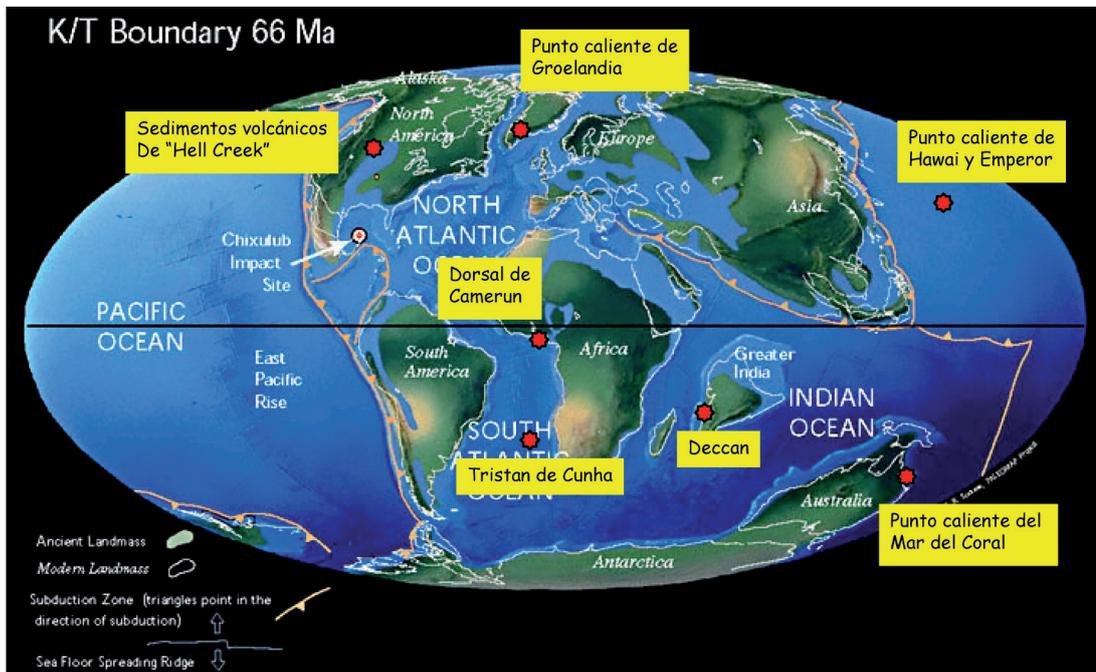


Fig. 6. Paleogeografía del límite Cretácico-Terciario. Se han señalado las principales áreas de emisiones volcánicas (de Dingus y Rowe, 1997). La paleogeografía es del Paleomap Project desarrollado por Christopher R. Scotese (<http://www.scotese.com/K/t.htm>).

La extinción de la mayoría de los foraminíferos planctónicos cretácicos coincidiendo con las evidencias del impacto es uno de los principales argumentos paleontológicos que sustentan esta hipótesis (Smit, 1999; Schulte *et al.*, 2010). Inicialmente Smit propuso que una sola especie cretácica sobrevivió al evento del límite, pero pronto se demostró que había más especies cretácicas que pasaron el límite y fueron extinguiéndose en la base del Terciario (Canudo *et al.*, 1991). En los últimos 20 años se ha refinado el registro a lo largo del mundo. Los datos apuntan que los foraminíferos planctónicos tropicales y subtropicales se extinguieron coincidiendo con el límite, pero que su efecto fue poco significativo en los de altas latitudes.

Resumiendo, hay una evidencia razonable de un impacto extraterrestre en el Yucatán que afectó tanto al Caribe como a la costa norteamericana. Hay una capa enriquecida de Iridio con distribución global (Schulte *et al.*, 2010), aunque para algunos autores su relación con Chicxulub es dudosa. Keller *et al.* (2009) apuntan que el impacto de Chicxulub se produjo a unos 300.000 años del límite. Además niegan su incidencia en los ecosistemas marinos y por tanto no debería considerarse como la causa de la extinción. Independientemente de esta polémica, se ha logrado reconocer un nivel de correlación global (nivel con evidencias de impacto) relacionado con un evento bioestratigráfico (la extinción de los foraminíferos) sea o no el impacto de Chicxulub. Esto nos da una potente herramienta cronoestratigráfica, y de hecho el límite K/T se ha situado en el corte de El Kef (Túnez) coincidiendo con la anomalía de Iridio (Arenillas *et al.*, 2001). Incluso si relacionamos la capa de Iridio con el impacto, esto no descarta que otros efectos hayan podido afectar a las biotas terrestres, incluyendo a los dinosaurios (Sarjeant y Currie, 2001).

EXTINCIÓN A LARGO PLAZO: EL VOLCANISMO

Los sedimentos volcánicos son frecuentes en el final del Cretácico (Fig. 6). Un buen ejemplo son los miles de metros de coladas volcánicas del Grupo Lameta (Maastrichtiense superior) del Deccan (parte occidental de la Península Índica). La mayor actividad volcánica se produjo alrededor de los 65 m.a., es decir muy cerca del límite K/T (Courtilot *et al.*, 1986). El volcanismo masivo durante un tiempo prolongado del final del Cretácico debió tener consecuencias medioambientales. De hecho, muchos investigadores son escépticos acerca del holocausto global propuesto para el escenario del impacto y proponen uno alternativo. En este escenario las especies de dinosaurios se extinguirían en los últimos miles de años del Cretácico (efecto a largo plazo) como consecuencia del volcanismo.

La influencia del volcanismo del Deccan en las biotas contemporáneas fue indudable. La más inmediata fue la destrucción de más de 800.000 km² de bosque tropical y la desaparición de gran número de plantas. Sin embargo, la mayor parte de las erupciones del Deccan fueron toleíticas y no explosivas, por lo que difícilmente pudieron afectar directamente a grandes animales. De hecho, los sedimentos que se encuentran entre las capas volcánicas tienen abundantes fósiles de vertebrados que resistieron el ambiente hostil (Prasad *et al.*, 1994). Estos grandes vertebrados serían afectados por la fragmentación del hábitat, teniéndose que mover hacia áreas cada vez más restringidas con recursos más escasos. Sin embargo, el efecto más importante para explicar una extinción a nivel global sería la gran cantidad de gases tóxicos expulsados en los niveles altos de la atmósfera. Estos gases alterarían, al menos local-

mente, el clima a medio y largo plazo. De hecho, el efecto invernadero ha sido identificado en el Grupo Lameta. El clima tropical del Cretácico Superior de esta zona pasó a ser más estacional y más árido, con desarrollo de grandes lagos alcalinos en el Cretácico terminal (Khadkikar *et al.*, 1999).

Alguna de las consecuencias del impacto extraterrestre serían similares a las del volcanismo, como por ejemplo la contaminación de la atmósfera, la reducción (o incluso la ausencia) de luz durante un corto período de tiempo como resultado del oscurecimiento por el material en suspensión, supresión de la fotosíntesis, lluvia ácida, enfriamiento global, crisis de carbonatos en las aguas oceánicas, estrés medioambiental, devastación de los ecosistemas y el colapso de la cadena alimenticia. El escenario de la extinción por la rotura de la cadena alimenticia es compatible tanto con el impacto como con el volcanismo. Se ha apuntado que la crisis biótica fue más severa en las regiones tropicales-subtropicales, mientras que en altas latitudes las faunas fueron menos afectadas. La mayor incidencia en la región tropical es coherente tanto por la localización del cráter del Yucatán, como por la del volcanismo del Deccan. Sin embargo, el volcanismo masivo carecería de las características letales instantáneas asociadas a un impacto extraterrestre, produciendo una extinción rápida, pero más gradual.

EL REGISTRO DE LOS DINOSAURIOS Y SUS CONSECUENCIAS EN EL K/T

Para saber si la extinción de los dinosaurios se produjo de una manera brusca o gradual y, sobre todo, si coincide con el evento de impacto, es neces-

sario revisar el registro de los dinosaurios del final del Cretácico. Se han citado en todos los continentes pero hay pocos lugares del mundo donde exista una buena documentación en relación al límite. Esto ha hecho que la extinción se haya interpretado como un acontecimiento tanto instantáneo, como gradual (Sheehan *et al.*, 2000; Sarjeant y Currie, 2001).

Norteamérica

La realización de la síntesis de los dinosaurios norteamericanos del final del Cretácico fue una de las consecuencias directas de la propuesta impactista. En Norteamérica había una buena representación de dinosaurios del Maastrichtiense superior por lo que parecía el lugar más adecuado para conocer el patrón de la extinción. Clemens (1992) afirmó que la extinción fue un proceso gradual durante los últimos siete millones de años del Cretácico para acelerarse en los últimos 300.000 años. La polémica estaba servida, tanto detractores como defensores de esta extinción escalonada comenzaron a buscar dinosaurios en los últimos dos millones de años del Cretácico de Norteamérica.

Este gran esfuerzo permitió conseguir un mejor registro del Maastrichtiense superior. A pesar de esto, hubo diferentes interpretaciones, algunos autores lo consideraron como prueba de una extinción instantánea, al no encontrar cambios significativos en las asociaciones de dinosaurios hasta el límite (Sheehan, 1992). Por el contrario, otros autores (ver referencias en Archibald, 2000) apuntaron que prácticamente estaban ausentes en los 3 últimos metros del Cretácico de la Formación Hell Creek. Posteriormente han existido diversas aportaciones a favor y en contra de la presencia de dinosaurios hasta el límite (Fastovsky y Sheehan, 2005). Un apunte necesario es decir que

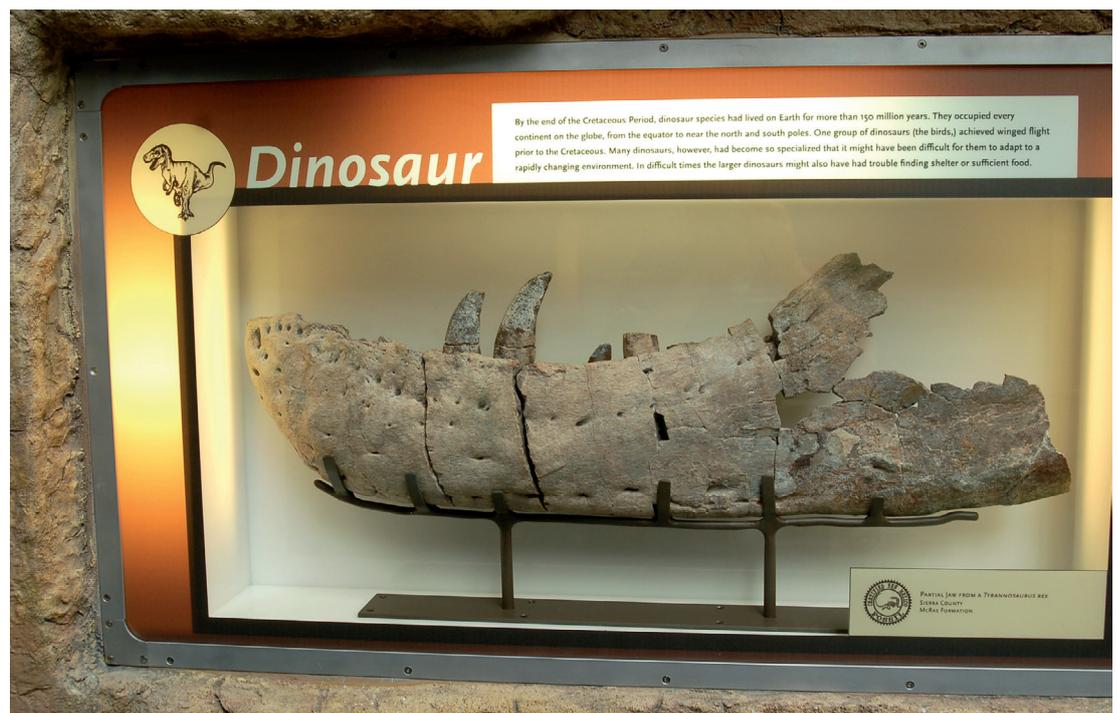


Fig. 7. Mandíbula del terópodo *Tyrannosaurus rex*, uno de los dinosaurios que vivieron en el Maastrichtiense superior de Norteamérica. Fue uno de los últimos dinosaurios no avianos en extinguirse. El ejemplar es del Museo de Paleontología de New Mexico (EE.UU.).

en esta formación no se encuentran las evidencias del impacto, por tanto hay cierta incertidumbre sobre dónde se sitúa el límite. Por otra parte, cerca de los niveles donde se coloca el límite no se han encontrado restos significativos y mucho menos acumulaciones de carcasas. En definitiva, si sólo usamos el registro fósil de la Formación Hell Creek, hay dificultades para interpretar si la extinción de los dinosaurios fue gradual o brusca en esta parte de Norteamérica (Hulburt y Archibald, 1995).

Si consideramos un intervalo temporal algo más amplio nos encontramos una significativa disminución de la biodiversidad de dinosaurios entre el Campaniense y el Maastrichtiense. Así, en la Formación Dinosaur Park del Campaniense de Canadá se han reconocido 35 especies. El número disminuye a menos de la mitad en las formaciones situadas por encima. La biodiversidad es mucho menor en el Maastrichtiense que en el Campaniense, incluso considerando la sobreprospectada Formación Hell Creek (Archibald, 1996). Por tanto, en el centro de EE.UU. está documentada una disminución gradual de taxones al final del Cretácico Superior, que pudo o no acelerarse en el Cretácico terminal (Fig. 7). Finalmente se extinguieron en el límite, aunque hasta esto plantea polémica.

Hay evidencias de presencia de los dinosaurios en la base del Terciario en la Cuenca de San Juan en Nuevo México (Fassett *et al.*, 2002). La presencia de huesos de dinosaurios en materiales datados como paleocenos se podría explicar por reelaboración. Sin embargo los estudios geoquímicos de Tierras Raras indican que la composición de los fósiles de la Formación Kirtland (Cretácico) es diferente de la hallada en los del Paleoceno (Formación Ojo Álamo). Además los huesos fósiles de la Formación Ojo Álamo carecen de evidencias de transporte, e incluso se ha encontrado un ejemplar de hadrosáurido parcialmente articulado. Estas evidencias demuestran la presencia de dinosaurios no avianos en la base del Paleoceno en el sur de EE.UU. (Fassett *et al.*, 2002; Fassett, 2009).

Asia

Los dinosaurios del Maastrichtiense superior en Asia se han descrito en la India, China y Siberia. El registro de la India es abundante, pero generalmente fragmentario. Los fósiles de dinosaurios se han encontrado en el Grupo Lameta, que es la unidad geológica donde ha quedado registrado el volcanismo del Deccan. Las edades radiométricas indican que las emisiones volcánicas comenzaron antes del límite (Courillot *et al.*, 1986), hecho que ha quedado comprobado al reconocerse la anomalía de Iridio en la sección Anjar. El límite está en una arcilla situada estratigráficamente sobre una caliza con restos de saurópodos titanosáuridos. Por encima del límite se han recuperado abundantes cáscaras de huevo y dientes de terópodo (Bajpai y Prasad, 2000).

En el Sureste de China, Stets *et al.* (1996) describieron el intervalo de límite Cretácico - Terciario a partir de cáscaras de huevo de dinosaurio con anómalas concentraciones de elementos-traza. Por encima de este intervalo sigue habiendo cáscaras, por tanto los dinosaurios en esta parte de Asia se encuentran en sedimentos del Paleoceno inferior. Trabajos posteriores han puesto de manifiesto la presencia del Nivel de Iridio que marca el límite (Zhao *et al.*, 2009). En el intervalo del límite hay doce ootaxones (taxones definidos con cáscaras de huevos) de dinosaurios, mientras que en sedimentos del Paleoceno (por encima del Nivel de Iridio) se reducen a cinco. El patrón de elementos traza e isótopos es complejo y parece estar relacionado con dos eventos, uno situado unos dos millones de años antes del límite y otro coincidiendo con este. Para Zhao *et al.* (2009) la extinción de los dinosaurios es el resultado de cambios en las condiciones ambientales a largo y corto plazo, con un envenenamiento medioambiental generalizado que afectó negativamente al proceso de reproducción.

Uno de los últimos registros añadidos al final del cretácico es el de Kakanaut (noroeste de Rusia). Godefroit *et al.* (2009) han descrito material fragmentario de hadrosaurios y terópodos no avianos, además de cáscaras de huevo en niveles del final del Cretácico. El registro paleobotánico indica que la temperatura media anual sería de unos 10°C en esta zona cercana al Ártico. Se trataba de un clima aparentemente muy frío para reptiles ectotérmicos. La diversidad significativa elevada de dinosaurios del Maastrichtiense superior en altas latitudes, donde los ectotermos están ausentes, parece indicar que la disminución de la temperatura no es causa suficiente para la extinción de los dinosaurios (Godefroit *et al.*, 2009), ya que algunos podrían adaptarse a temperaturas frías. Con la aportación de estos autores, la extinción de los dinosaurios polares parece que encaja mejor con una desestabilización medioambiental producto de un impacto meteorítico.

Europa

El registro de dinosaurios del final del Cretácico es abundante en países como España, Francia y Rumania. Sin embargo, existe el problema de conocer con exactitud la distribución del registro de dinosaurios alrededor del límite debido a la ausencia del nivel de impacto en los sedimentos continentales. En el Campaniense dominan los saurópodos con una presencia significativa de los nodosáuridos, sin embargo en el Maastrichtiense tardío dominan los hadrosaurios y desaparecen los nodosáuridos (Buffetaut y Le Loeuff, 1997). Este reemplazamiento de faunas se ha relacionado con la regresión marina del final del Cretácico. Los huevos y los restos directos de dinosaurios son abundantes en el Campaniense-Maastrichtiense inferior de la cuenca de Tremp (Lleida, ver referencias en Riera

Fig. 8. Cráneo del hadrosáurido *Arenysaurus ardevoli* durante su proceso de extracción de la matriz. Este dinosaurio proviene del Maastrichtiense superior de Arén (Huesca), siendo uno de los últimos dinosaurios no avianos. En la localidad de Arén se puede visitar una exposición con los restos de este dinosaurio.



et al., 2009) y su aparente escasez en niveles del Maastrichtiense superior hizo que algunos autores afirmaran que los dinosaurios europeos se extinguieron dos millones de años antes del límite (Galbrun, 1997). Sin embargo, los descubrimientos del final de la década de los 90 han demostrado que los dinosaurios están representados hasta el final del Cretácico en el Pirineo español (López-Martínez *et al.*, 2001; Vila *et al.*, 2008; Riera *et al.*, 2009).

Desde mediados de la década de 1990, nuestro grupo de investigación está haciendo un gran esfuerzo por documentar la biodiversidad de los dinosaurios del Maastrichtiense superior del Pirineo aragonés. El tránsito entre el Cretácico y el Terciario aflora sin rupturas significativas en sedimentos continentales y de transición en los alrededores de Arén (Huesca). Una sorpresa inesperada fue el descubrimiento de una significativa biodiversidad en el Maastrichtiense superior. Al menos hay una especie de un saurópodo titanosaurio, tres especies de hadrosaurios, una de ellas la hemos descrito como nueva, *Arenysaurus ardevoli*, (Fig. 8) y, al menos, 4 especies de dinosaurios terópodos, pero podría haber más taxones representados. (López-Martínez *et al.*, 2001; Pereda Suberbiola *et al.*, 2009). El estudio estratigráfico en detalle y la magnetoestratigrafía nos permitió colocar el límite en un nivel cercano a la desaparición de los últimos dinosaurios. Pero como sucede en otras partes del mundo no se ha encontrado el nivel con las evidencias de impacto, y por tanto desconocemos si se

extinguen un poco antes, a la vez o poco después del impacto. Teniendo en cuenta la calidad de su registro paleontológico, los Pirineos españoles pueden ser una de las áreas clave en la elaboración del modelo definitivo para explicar la extinción.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En las páginas anteriores se ha realizado una breve síntesis de los datos que tenemos sobre la extinción de los dinosaurios. Las evidencias de un gran impacto extraterrestre en el golfo de Méjico son indiscutibles (Schulte *et al.*, 2010), como lo son las importantes consecuencias medioambientales que produjo a nivel regional y quizás a nivel global. Pero surgen dos preguntas clave: ¿tenemos suficiente información para relacionar la extinción con las evidencias del impacto?, y ¿el impacto fue la única razón de la extinción de los dinosaurios? Para contestar a estas preguntas hay que sintetizar algunos datos anteriores. En primer lugar, está bien documentada la disminución de la biodiversidad de los dinosaurios del Maastrichtiense superior respecto al Campaniense. En segundo lugar nunca se han encontrado restos fósiles de dinosaurios en relación con el nivel que presenta evidencias de impacto, y para muchos autores los restos de dinosaurios inmediatamente antes del límite son muy escasos. En tercer lugar, en diferentes partes del mundo se han encontrado restos de dinosaurios no avianos en la base del Terciario, lo que indica que la extinción de

los dinosaurios (considerada como la muerte del último individuo) es cientos de miles de años posterior al impacto. Por tanto, el registro de dinosaurios conocido no encaja con un modelo catastrofista estricto en el que se considera un mundo "tipo Ediacara" destruido por el impacto extraterrestre del Cretácico. Para explicar esta extinción es necesario plantear otro modelo algo más complejo.

La extinción de dinosaurios no avianos al final del Cretácico fue posiblemente producto de la conjunción de varios fenómenos geológicos: significativos cambios eustáticos, una de las mayores emisiones volcánicas de la historia moderna de la Tierra y el impacto de un gran meteorito. Los cambios en las aguas oceánicas pudieron producir la reestructuración de la circulación marina con una disminución de las temperaturas y un significativo estrés ambiental durante el final del Cretácico. La actividad volcánica cerca del límite pudo acentuar dicho estrés, siendo el impacto extraterrestre un acelerador de los procesos de extinción. Finalmente los últimos dinosaurios no avianos irían desapareciendo paulatinamente en los primeros miles de años del Terciario en los lugares donde habían sobrevivido al evento asociado al límite.

Se carece de razones objetivas para considerar que estos tres fenómenos son excluyentes, y de hecho algunos de los mecanismos causantes de la extinción son los mismos. La causa última, "el agente asesino" que terminó por acabar con el último individuo de cada especie es difícil de identificar. Parece más fácil buscar un conjunto de causas que achacar todo el proceso a un acontecimiento único, aunque no cabe duda de que el impacto extraterrestre pudo ser una de las principales causas.

En el punto de partida de esta contribución nos preguntábamos ¿qué nos enseña la extinción de los dinosaurios sobre la historia de la vida y de la Tierra? Como se desprende de los párrafos anteriores, hay tres ideas generales que deben destacarse: la primera enseñanza es que los cambios en las asociaciones de los organismos en la Tierra pueden producirse muy rápidamente por acción de fenómenos terrestres y/o extraterrestres. En segundo lugar, que la vida en su conjunto es capaz de superar grandes cataclismos, aunque grupos completos de organismos se extingan. La tercera es que, en cada momento, la vida de la Tierra está en consonancia con las condiciones medioambientales. Por tanto la vieja (pero moderna) idea de Gaia de considerar a la Tierra en su conjunto parece acertada.

AGRADECIMIENTOS

La investigación del grupo Aragosaurus-IUCA de la Universidad de Zaragoza está subvencionada por la Diputación General de Aragón (Dirección General de Patrimonio Cultural y Grupos Consolidados) y el Ministerio de Educación y Ciencia (CGL2007-62469).

Nuestro agradecimiento al pueblo de Arén personalizados en los dos sucesivos alcaldes Joaquín y Miguel. La ruta de los yacimientos y el Museo de Arén es una interesante visita para los que quieran conocer sobre los últimos dinosaurios europeos.

BIBLIOGRAFÍA

Alvarez, W., Alvarez, L. W., Asaro, F. y Michel, H. (1980). Extraterrestrial cause for the Cretaceous-Tertiary extinction. *Science*, 208, 1095-1108.

Archibald, J. D. (1996). *Dinosaur Extinction and the End of an Era: What the Fossils Say*. Columbia University. New York.

Archibald, J. D. (2000). Dinosaur abundance was not declining in a "3 m gap" at the top of the Hell Creek Formation, Montana and North Dakota; comment. *Geology*, 28, 1150.

Arenillas, J. I., Arz, J. A. y Molina, E. (2001). Quantifying the evolutionary turnover across the K-T boundary catastrophic planktic foraminiferal extinction even at El Kef, Tunisia. *GFF*, 124, 121-126.

Bajpai, S. y Prasad, G. V. R. (2000). Cretaceous age for Ir-rich Deccan Intertrappean deposits; palaeontological evidence from Anjar, western India. *Journal of the Geological Society of London*, 157, 257-260.

Benton, M. J. (1990). Scientific methodologies in collision: The story of the study of the extinction of the dinosaurs. *Evolutionary Biology*, 24, 371-400.

Buffetaut, E. y Le Loeuff, J. (1997). Late Cretaceous dinosaurs from the foothills of the Pyrenees. *Geology Today*, March-April, 60-68.

Canudo, J. I. (2005). Los bucardos y meteoritos: La extinción de los dinosaurios. La Vida y los ambientes sedimentarios en el Período Cretácico. *Publicaciones del Seminario de Paleontología de Zaragoza*, 7, 183-217.

Canudo J. I., Keller G., Molina E. 1991. K/T boundary extinction pattern and faunal turnover at Agost and Caravaca, SE Spain. *Marine Micropaleontology*, 17, 319-341.

Courtillot, V., Besse, J., Vandamme, D., Montigny, R., Jaeger, J.-J. y Cappetta, H. (1986). Deccan flood basalts at the Cretaceous/Tertiary boundary? *Earth and Planetary Science Letters*, 80, 361-374.

Dingus, L. y Rowe, T. 1997. *The mistaken extinction. Dinosaur Evolution and the Origin of birds*. W. H. Freeman and Company (eds.). New York.

Fassett, J. E. (2009). New geochronologic and stratigraphic evidence confirms the Paleocene age of the dinosaur-bearing Ojo Alamo sandstone and Animas Formation in San Juan Basin in New Mexico and Colorado. *Palaeontologia Electronica*, 12, 1-146.

Fassett, J. E., Zielinski, R. A. y Budahn, J. R. (2002). Dinosaurs that did not die: Evidence for Paleocene dinosaurs in the Ojo Alamo Sandstone, San Juan Basin, New Mexico. *Geological Society of America, Special Paper*, 356, 307-335.

Fastovsky, D. E. y Sheehan, P. M. (2005). The extinction of the dinosaurs in North America. *GSA Today*, 15, 4-10.

Galbrun, B. (1997). Did the European dinosaurs disappear before the K-T event? Magnetostratigraphic evidence. *Earth and Planetary Science Letters*, 148, 569-579.

Godefroit, P., Golovneva, L., Shchepetov, S., García, G. y Alekseev, P. (2009). The last polar dinosaurs: high diversity of latest Cretaceous arctic dinosaurs in Russia. *Naturwissenschaften*, 96, 495-501.

- Hildebrand, A. R., Penfield, G. T., Kring, D. A., Pilkington, M., Camargo, Z. A., Jacobsen, S. B. y Boynton, W. V. (1991). Chicxulub Crater: A possible Cretaceous-Tertiary impact crater on the Yucatán Peninsula, Mexico. *Geology*, 19, 867-871.
- Hurlbert, S. H. y Archibald, J. D. (1995). No statistical support for sudden (or gradual) extinction of dinosaurs. *Geology*, 23, 881-884.
- Keller, G., Adatte, T., Pardo Juez, A. y López-Oliva, J. (2009). New evidencie concerning the age and biotic effects of the Chicxulub impact in NE Mexico. *Journal of the Geological Society, London*, 166, 393-411.
- Khadkikar, A. S., Sant, D. A., Gogte, V. y Karanth, R. V. (1999). The influence of Deccan volcanism on climate: insights from lacustrine intertrappean deposits, Anjar, western India. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 147, 141-149.
- López-Martínez, N., Canudo, J. I., Ardévol, L., Pereda Suberbiola, X., Orue-Etxebarria, X., Cuenca-Bescós, G., Ruiz-Omeñaca, J. I., Murelaga, X. y Feist, M. (2001). New dinosaur sites correlated with Upper Maastrichtian pelagic deposits in the Spanish Pyrenees: implications for the dinosaur extinction pattern in Europe. *Cretaceous Research*, 22, 41-61.
- Paladino, F. V., Spotila, J., Dodson, P. y Hammond, J. K. (1989). Temperature dependent sex determination for reptiles, and the implications for dinosaur population dynamics and possible extinction. *Geological Society of America, Special Paper*, 238, 63-70.
- Pereda Suberbiola, X., Canudo, J. I., Cruzado-Caballero, P., Barco, J. L., López-Martínez, N., Oms, O. y Ruiz-Omeñaca, J. I. (2009). The last hadrosaurid dinosaurs of Europe: A new lambeosaurine from the Uppermost Cretaceous of Aren (Huesca, Spain). *Comptes Rendus Palevol*, 8, 559-572.
- Prasad, G. V. R., Jaeger, J. J., Sahni, A., Gheerbrandt, E. y Khajuria, C. K. (1994). Eutherian mammals from the Upper Cretaceous (Maastrichtian) intertrappean beds of Naskal, Andhra Pradesh, India. *Journal of Vertebrate Paleontology*, 14, 260-277.
- Riera, V., Oms, O., Gaete, R. y Galobart, A. (2009). The end-Cretaceous dinosaur succession in Europe: The Tremp Basin record (Spain). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 283, 160-171.
- Sanz, J. L. (1999). *Los dinosaurios voladores. Historia evolutiva de las aves primitivas*. Libertarias/Prodhufi. Madrid.
- Sarjeant, W. A. S. y Currie, P. J. (2001). The Great Extinction that never happened: the demise of the dinosaurs considered. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 38, 239-247.
- Sheehan, P. M. (1992). Major extinctions of land-dwelling vertebrates at the Cretaceous - Tertiary boundary, eastern Montana. *Geology*, 20, 556-560.
- Sheehan, P. M., Fastovsky, D. E., Barreto, C. y Hoffmann, R. G. (2000). Dinosaur abundance was not declining in a "3 m gap" at the top of the Hell Creek Formation, Montana and North Dakota. *Geology*, 28, 6, 523-526.
- Schulte, P., Alegret, L., Arenillas, A., Arz, J. A., et al. (2010). The Chicxulub Asteroid Impact and Mass Extinction at the Cretaceous-Paleogene Boundary. *Science*, 327, 1214-1218.
- Smit, J. (1999). The global stratigraphy of the Cretaceous-Tertiary boundary impact ejecta. *Annual Review of Earth Planetary Sciences*, 27, 75-113.
- Stets, J., Ashraf, A.-R., Erben, H. K., Hahn, G., Hambach, U., Krumsiek, K., Thein, J. y Wurster, P. (1996). The Cretaceous-Tertiary Boundary in the Nanxiong Basin (Continental Facies, Southeast China). En: *Cretaceous-Tertiary mass extinctions. Biotic and environmental changes*. N. McLeod y G. Keller (eds.), W. W. Norton and Company, New York, 349-371.
- Vila, B., Oms, O., Marmi, J., Galobart, A. (2008). Tracking Fumanya footprints (Maastrichtian, Pyrenees): historical and ichnological overview. *Oryctos*, 8, 115-130.
- Zhao, Z., M. X.-Y., Chai, Z.-F., Yang, G.-G., Zhang, F.-C. y Yan, Z. (2009). Geochemical environmental changes and dinosaur extinction during the Cretaceous-Paleogene (K/T) transition in the Nanxiong Basin, South China: Evidence from dinosaur eggshells. *Chinese Science Bulletin*, 54, 806-815.

Los interesados en consultar más literatura sobre la extinción de los dinosaurios pueden hacerlo en Bibliosaurus (www.aragosaurus.com). Si se pone en el campo de edad, límite K/T se puede conseguir el listado de todas las referencias sobre el registro fósil de los últimos dinosaurios cretácicos.■

Este artículo fue solicitado desde E.C.T. el día 17 de diciembre de 2009 y aceptado definitivamente para su publicación el 15 de mayo de 2010.