

El impacto de un asteroide en Yucatán y la gran extinción del límite Cretácico/Terciario

José Antonio Arz*, Ignacio Arenillas**, Eustoquio Molina**

Hace 65 millones de años, en el límite entre los periodos Cretácico y Terciario (límite K/T), los ecosistemas de nuestro planeta cambiaron bruscamente, produciéndose una de las mayores extinciones biológicas de la historia de nuestro planeta. Más de la mitad de las especies presentes a finales del Cretácico se extinguieron de forma repentina, por lo que este evento se ha catalogado como una extinción en masa catastrófica. El debate que ha suscitado entre los paleontólogos ha provocado el surgimiento de un neocatastrofismo en las ciencias de la tierra. Esta corriente acepta el postulado de que, junto con los procesos geológicos normalmente lentos y graduales, han tenido lugar eventos catastróficos, violentos y rápidos que han alterado la superficie de nuestro planeta (figura 1). El límite K/T ha provocado un apasionante debate científico, inicialmente en Europa y Estados Unidos y en la actualidad en México y el Caribe.

La existencia de un cambio radical de la flora y fauna entre el Cretácico y el Terciario ha sido evidente para los paleontólogos desde hace por lo menos 150 años. Es también muy familiar para el público en general, debido a que fue en ese momento cuando se produjo la misteriosa desaparición de los dinosaurios. Los dinosaurios, que sin duda son los reptiles fósiles más divulgados y los más espectaculares de todas las épocas, se desarrollaron a partir del Triásico y predominaron durante el Jurásico y Cretácico. Generalmente se piensa que los dinosaurios formaron un grupo homogéneo, pero entre ellos se encontraban los animales terrestres más corpulentos que jamás han existido (algunos debieron alcanzar hasta 50 toneladas de peso), muchos eran de tamaño más pequeño, como un canguro, y algunos no eran mayores que un ave de corral. De pronto, todo este enorme grupo de animales que había dominado la Tierra durante más de 150 millones

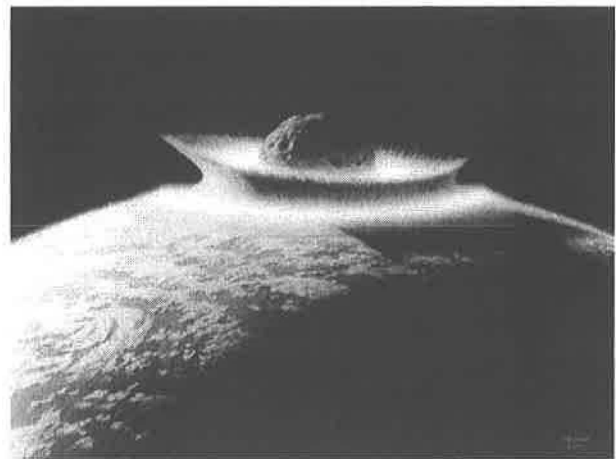


Fig. 1. Recreación artística de un meteorito impactando sobre la Tierra. Autor: Don Davis.¹⁰

de años desapareció sin dejar descendencia.¹ Géneros completos de carnosaurios con su poderosa dentición carnívora como la del tiranosaurio, de ceratópsidos como los triceratop, torosaurios y afines o de saurópodos como diferentes géneros de diplodócidos, camarasauridos y titanosauridos desaparecieron en coincidencia con el límite K/T.

El evento no sólo provocó la extinción de estos grandes reptiles sino también la de grupos enteros de organismos que llevaban sobre el planeta decenas o cientos de millones de años. Se extinguieron los plesiosaurios, mosasaurios e ictiosaurios, considerados en la literatura como los «dinosaurios marinos». También desaparecieron para siempre los «dinosaurios vo-

* Facultad de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Nuevo León. 67700, Linares, Nuevo León (México).

** Departamento de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias, Universidad de Zaragoza. 50009, Zaragoza (España)

ladores», como los pterosaurios. Otros vertebrados como los elasmobranquios (tiburones y rayas), los peces actinopterigios e incluso los mamíferos primitivos también sufrieron una tasa anormal de extinción. Entre los invertebrados, los moluscos nadadores como los ammonites o belemnites y constructores de arrecifes como los rudistas sufrieron una extinción total en el límite K/T. Otros grupos como los braquiópodos, corales, gasterópodos, trigónidos y ostreidos fueron severamente reducidos.

Sin embargo, son los organismos flotadores del plancton marino, como los foraminíferos planctónicos, los que aportan las mejores evidencias sobre la existencia de una extinción en masa catastrófica en el límite K/T. Desde que comenzó el debate en torno al evento del límite, este grupo ha adquirido una gran importancia debido a su excelente registro fósil. Son pobladores microscópicos de la parte más superficial de los océanos y, al morir, sus caparazones caen al fondo oceánico, acumulándose junto con los sedimentos que se depositan en ese momento. Son, por tanto, unos excelentes indicadores bio y cronoestratigráficos y permiten detallar con gran fiabilidad sus patrones de evolución y de extinción. Por esta razón, los primeros trabajos sobre la extinción de los foraminíferos planctónicos en el límite K/T fueron los que arrojaron datos más precisos.^{2,3}

Los primeros estudios

W. Berggren² fue uno de los primeros en advertir la existencia de un importante y rápido cambio faunístico de las asociaciones de foraminíferos planctónicos en el límite K/T. No obstante, este brusco cambio se interpretó como el producto de un hiato sedimentario, dada la enorme diferencia morfológica existente entre las especies de foraminíferos planctónicos del Cretácico y las primeras del Terciario. En la mayoría de las secciones estratigráficas continuas, las rocas que contienen especies cretácicas están separadas de aquellas que contienen especies terciarias por una fina capa de arcilla oscura prácticamente azoica (arcilla del límite), cuya base marca justo el límite K/T. Para interpretar esta arcilla y contestar a la pregunta de si realmente existía una discontinuidad estratigráfica en el límite K/T, algunos geólogos fueron a una hermosa localidad italiana llamada Gubbio. En sus alrededores se encontraron con rocas depositadas en condiciones marinas profundas, ricas en foraminíferos planctónicos y que aparentemente mostraban una continuidad sedimentaria.

En 1964, H.P. Luterbacher e I. Premoli-Silva³ publicaron un trabajo sobre el corte de Gubbio donde se confirmaba la hipótesis de un cambio brusco y rápido de las asociaciones de foraminíferos planctónicos en el límite K/T. Su estudio bioestratigráfico puso de manifiesto la inexistencia de un hiato sedimentario en Gubbio. Justo en la parte basal del Terciario y coincidiendo con la arcilla del límite, encontraron un nuevo conjunto de especies de foraminíferos planctónicos, muy simples y pequeñas. Estas especies eran más antiguas que las identificadas por Berggren en la parte basal del Terciario y constituían la base filogenética a partir de la cual había evolucionado el resto de las especies terciarias. Todo parecía indicar que el brusco cambio de las asociaciones faunísticas entre el Cretácico y el Terciario (figura 2) no era producto de la discontinuidad del registro rocoso y fósil, sino de un verdadero cambio biológico brusco y repentino.

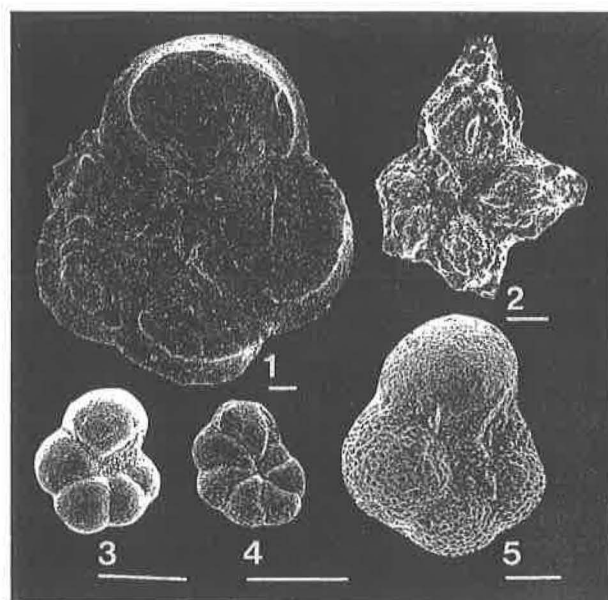


Fig. 2. Foraminíferos planctónicos del Cretácico más alto. 1) *Abathomhalus mayaroensis* (Bolli); 2) *Plummerita hantkeninoides* (Brönnimann). Foraminíferos planctónicos del Terciario más bajo: 3) *Parvularugoglobigerina eugubina* (Luterbacher y Premoli-Silva); 4) *Parvularugoglobigerina longiapertura* (Blow); 5) *Parasubbotina pseudobulloides* (Plummer).

Calibrando el tiempo

Con el fin de detallar con mayor precisión el intervalo de tiempo durante el cual se depositó la capa de arcilla en Gubbio, L. Alvarez, W. Alvarez, F. Asaro y H. Michel⁴

analizaron su contenido en elementos del grupo del platino. Entre ellos se encuentra el iridio (Ir), relativamente abundante en los meteoritos y muy escaso en la corteza de la Tierra. Hoy en día, la mayor parte del Ir y de los otros elementos del grupo del platino proviene del polvo meteorítico que cae constantemente a la Tierra desde el espacio exterior. La cantidad de Ir que cae acumulándose en los sedimentos es una cantidad aproximadamente constante en el tiempo. Esto significa que puede ser utilizada como indicadora de la tasa de sedimentación: si la proporción de Ir en la roca es alta, significa que la tasa de sedimentación es baja, o que la sedimentación se hizo de forma muy lenta; por el contrario, si la proporción de Ir es baja, la tasa de sedimentación será alta.

Antes de analizar geoquímicamente la arcilla del límite en Gubbio, Alvarez y sus colaboradores supusieron que si el origen de la arcilla era producto de la desaparición temporal de organismos productores de carbonato y, por tanto, de un descenso generalizado de la tasa de sedimentación, la proporción de Iridio en la arcilla debería ser alta. Sin embargo, los resultados fueron espectaculares, se encontró una concentración de 30-90 veces superior a la esperada. Todo ello les llevó a proponer que la arcilla se había acumulado en tan solo unos miles de años y que la anómala concentración de Ir sólo podía explicarse convenientemente mediante la existencia de un impacto meteorítico de grandes dimensiones (figura 1). Este equipo publicó en 1980 un artículo en la revista *Science* donde se sugirió por primera vez de una forma científicamente documentada la existencia de una relación causa-efecto entre el impacto de un gran meteorito y la extinción en masa del límite K/T. Asimismo y en el mismo año, J. Smit y J. Hertogen⁴ publicaron en *Nature* un artículo sobre el corte de Caravaca (España), encontrando las mismas evidencias y llegando a conclusiones similares.

El modelo de extinción de los foraminíferos planctónicos

Una vez calibrado el tiempo aproximado de sedimentación de la arcilla del límite, se pudo comprobar que los cambios faunísticos eran excesivamente rápidos para que hubiesen sido ocasionados por causas graduales de tipo terrestre. El siguiente paso fue estudiar el modelo de extinción en el tránsito K-T con diferentes grupos de organismos. Sin embargo, no todos los grupos tienen un buen registro fósil. En consecuencia, deben elegirse aquellos grupos de organismos que sean pe-

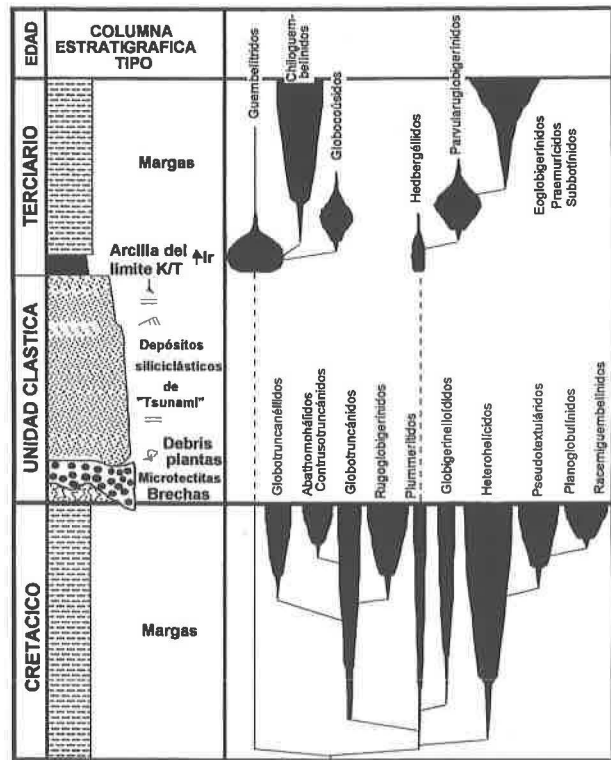


Fig. 3. Extinción de los grupos de Foraminíferos planctónicos en el tránsito K-T y aparición de grupos durante el Terciario más bajo.

queños, abundantes, de evolución rápida y con amplia distribución paleogeográfica. Desafortunadamente, los dinosaurios son un mal ejemplo en este sentido. No ocurre lo mismo con los foraminíferos planctónicos, ya que éstos son uno de los mejores indicadores bioestratigráficos y paleoecológicos del medio marino. Además, su pequeño tamaño permite realizar muestreos muy detallados. Por esta razón, el estudio de estos organismos a través del tránsito K-T se ha convertido en una herramienta clave. Nuestro equipo se ha especializado precisamente en este grupo, estudiando los cortes españoles y tunecinos del tránsito K-T más expandidos y continuos del mundo conocidos hasta la fecha (Agost, Caravaca, Ain Settara, El Kef, Elles...). Este estudio nos ha permitido catalogar la extinción de los foraminíferos planctónicos en el tránsito K-T como una extinción en masa catastrófica compatible con los efectos que produciría el impacto de un meteorito⁶ (figura 3).

Justo antes del límite, los foraminíferos planctónicos presentaban la máxima diversidad evolutiva de toda su historia, con casi 70 especies presentes en los mares. La mayoría tenían un tamaño relativamente grande y una alta complejidad en la arquitectura de sus conchas

y en la ornamentación de la superficie de sus caparazones. Según nuestros datos,⁶ no hay grandes cambios ni cualitativos ni cuantitativos en las asociaciones de foraminíferos planctónicos justo antes del límite K/T, observándose tan sólo la desaparición del 5% de las especies, que es interpretada como una extinción normal de fondo. De pronto y en coincidencia con el límite K/T se produjo la extinción simultánea de la mayor parte de las especies cretácicas (en torno al 70%). El descenso de la productividad biológica de los océanos justo después del evento fue tan fuerte que provocó un descenso de la tasa de sedimentación en medios marinos profundos, cuyo principal aporte de carbonatos era la caída de conchas de foraminíferos hasta el fondo oceánico. Es posible que las especies más oportunistas y ecológicamente más generalistas sobrevivieran a este evento. De hecho, cerca del 25% de las especies se han identificado en la arcilla del límite y en los sedimentos de la base del Terciario, pero existe la razonable duda de si todas son especies supervivientes o si muchas son ejemplares reelaborados provenientes de los sedimentos cretácicos. Sean o no todas estas especies supervivientes, no cabe duda de que la extinción fue realmente catastrófica.

Por encima del límite K/T, aparecieron especies nuevas de foraminíferos planctónicos, muy simples, oportunistas y con un tamaño diez veces inferior a las anteriores. Estas especies fueron gradualmente reemplazadas por otro conjunto de especies más grandes y más complejas, iniciándose la recolonización de los nichos ecológicos desocupados por las especies cretácicas recién extinguidas. La radiación evolutiva identificada es también la más importante de la historia evolutiva de los foraminíferos planctónicos, aconteciendo justo después del límite y nunca antes. Por todo ello, dicho modelo de extinción es muy compatible con la teoría de una enorme y brusca catástrofe paleoclimática inducida por un impacto meteorítico.

Buscando nuevas evidencias

Hoy en día, la hipótesis impactista se considera la mejor documentada para explicar la crisis biológica del límite K/T. Sin embargo, algunos científicos dudan de la capacidad destructiva de un impacto de estas dimensiones y consideran que las extinciones fueron más graduales y provocadas por múltiples causas de origen terrestre.⁷ La conjunción de fenómenos como la aceleración e incremento en intensidad del vulcanismo a escala global y cambios en la circulación oceánica y

del nivel del mar, pudo provocar un escenario similar al de un impacto meteorítico, pero extendido en un intervalo de tiempo mucho mayor. Esta hipótesis se apoya, entre otras cosas, en aparentes desapariciones generalizadas previas al límite K/T, que sugieren un modelo de extinción más gradual de diversos grupos como los dinosaurios, los ammonites e, incluso, los propios foraminíferos planctónicos. Sin embargo, conforme más se avanza en el estudio del registro fósil y más intensas son las campañas de muestreo, cada vez se hace más evidente que la extinción fue catastrófica. Por ejemplo, en el caso de los ammonites, que se suponía habían desaparecido poco antes del límite K/T, se ha demostrado que se extinguen en el mismo límite en coincidencia con las evidencias de impacto.

En la última década, el estudio detallado de nuevos cortes del tránsito K-T repartidos a lo largo de todo el globo terrestre ha aportado nuevas y variadas evidencias geoquímicas, mineralógicas y geofísicas de la existencia de este impacto. Podemos destacar la presencia de cuarzo de impacto, que son cristales de cuarzo dañados de forma insólita, con múltiples bandas de deformación planar y cuya presencia se ha ligado tradicionalmente a lugares de impactos meteoríticos recientes. También se han encontrado espinelas de níquel y nanodiamantes generados a miles de atmósferas de presión. Otra evidencia la constituyen las microtectitas de vidrio o microesférulas alteradas que representarían el material fundido por el impacto, lanzado en órbitas balísticas y depositado en los alrededores del cráter.

El hallazgo de un posible cráter de 150 km de diámetro, coincidente con el límite K/T, ha dado un fuerte espaldarazo a la hipótesis impactista.⁸ Este cráter se encuentra enterrado en la actualidad bajo centenares de metros de sedimentos terciarios al norte de la península del Yucatán en México. El centro del cráter se sitúa aproximadamente bajo la población de Chicxulub, un pequeño pueblo portuario de Yucatán. La presencia de este cráter provoca perturbaciones en los campos gravitacional y magnético, las cuales fueron identificadas inicialmente por personal de PEMEX en las décadas de los cincuenta y de los setenta.⁹ En superficie, estas anomalías aparecen formando patrones característicos de distribución aproximadamente circular (en especial las anomalías gravimétricas), por lo que fueron relacionadas con la presencia de un cráter de impacto. Por otra parte, en el Golfo de México y en el Caribe se han identificado depósitos arenosos con estructuras sedimentarias de alta energía correspondientes al tránsito K-T (figura 4), los cuales han sido interpretados



Fig. 4. Principales afloramientos del tránsito K-T en el Golfo de México y su posición relativa con respecto al cráter de Chicxulub.

recientemente como sedimentos transportados desde el continente por grandes olas tsunami levantadas durante el impacto.

El escenario

Estudiando las pruebas aportadas por los partidarios de la hipótesis impactista, todo parece indicar que un asteroide de más de 10 km de diámetro impactó violentamente sobre la plataforma continental de Yucatán y desencadenó una de las mayores extinciones de la historia de la Tierra. El impacto provocó una gigantesca compresión del orden de 1 000 gigapascales y diferentes transformaciones mineralógicas de la roca impactada, conocidas como metamorfismo de choque o de impacto. La potencia mecánica y térmica de este impacto fue equivalente a centenares de veces el actual arsenal mundial de bombas atómicas y nucleares.

El calor desarrollado en la zona de impacto produjo la vaporización y fusión de las rocas en un área circular de decenas de kilómetros de diámetro. La gigantesca compresión ocasionó la excavación de un cráter de 150 km de diámetro con una protuberancia central, que es interpretada como el resultado del rebote elástico y/o colapso gravitatorio que tuvo lugar inmediatamente después del impacto. Gran parte del material impactado fue fragmentado y eyectado a la atmósfera,

mientras que otra parte se depositó o quedó dentro del cráter formando brechas cementadas por el material fundido. Los metales volatilizados durante el impacto, como el Ir, se dispersaron globalmente, concentrándose posteriormente en la arcilla del límite.

Durante un breve periodo de tiempo, nuestro planeta se convirtió en un lugar extremadamente inhóspito. El primer acontecimiento tras el impacto del asteroide fue el desplazamiento de una oleada de aire caliente y de partículas incandescentes proyectadas desde el lugar del choque, provocando numerosos incendios en las áreas continentales cercanas. Se ha estimado que casi el 20% de la reserva forestal del planeta se consumió en estos incendios, siendo especialmente afectados los bosques de Norteamérica.

Al mismo tiempo, las ondas de choque del impacto elevaron en el mar gigantes olas tsunami que batieron en las costas de todo el Golfo de México. El polvo generado por el impacto y esparcido en la atmósfera ocasionó un oscurecimiento global de la misma durante varios meses, iniciando el cese parcial de la fotosíntesis. La temperatura de la Tierra bajó varios grados y afectó la reproducción de los animales terrestres, que sucumbieron en unos meses por falta de alimentos y por las muy adversas condiciones climáticas. Durante varios meses la Tierra estuvo inmersa en una especie de invierno nuclear de consecuencias no del todo conocidas.

Desde el lugar del impacto también se generó y eyectó por volatilización SO_2 y NO_x que contaminaron toda la superficie del planeta, provocando lluvia ácida (ácidos nítrico y sulfúrico), la acidificación de la superficie marina y la extinción de la fauna planctónica. Las condiciones no se restablecieron hasta pasados miles de años y esto fue posible gracias al aporte de material carbonatado resultante de la erosión de los continentes que neutralizó el pH. Como efecto secundario final del impacto, se produjo un efecto invernadero inducido por el CO_2 volatilizado de la plataforma y la destrucción de los grandes consumidores fotosintéticos de CO_2 , como el fitoplancton. Del frío se pasó al calor y éste no cesó hasta que el plancton marino y la flora terrestre volvieron a surgir.

La destrucción del fitoplancton y de los bosques rompió por completo toda la cadena alimenticia, produciendo la extinción de los grandes consumidores primarios y secundarios, es decir, herbívoros y carnívoros dependientes directa o indirectamente del fitoplancton y de las plantas terrestres. Sin embargo, los organismos sedimentívoros marinos y detritívoros continentales,

como los insectos, sobrevivieron al evento, junto con sus consumidores, es decir, organismos bentónicos marinos e insectívoros como los mamíferos, saurios y ofidios. Todo ello contribuyó a que los pequeños mamíferos insectívoros, que pasaron desapercibidos durante el Mesozoico entre los dinosaurios, tuvieran la oportunidad de expandirse durante el Terciario y dominar los continentes, contribuyendo a la aparición hace unos 100.000 años de nuestra propia especie.

Resumen

En el límite Cretácico/Terciario (K/T), hace 65 millones de años, se produjo una de las mayores extinciones en masa de la historia biológica de la Tierra, desapareciendo entre otros los animales más espectaculares de todos los tiempos: los dinosaurios. La extinción en masa fue catastrófica y afectó a más de la mitad de las especies presentes al final del Cretácico. El estudio de microorganismos marinos fósiles como los foraminíferos planctónicos permite evaluar la intensidad de este evento de extinción. Esta crisis biológica fue provocada probablemente por el impacto de un asteroide sobre la plataforma continental de la Península del Yucatán.

Palabras clave: foraminíferos planctónicos, impacto, límite K/T, México, extinción en masa.

Abstract

At the Cretaceous/ Tertiary (C/T) boundary, 65 million of years ago, one of the greatest mass extinctions of the biological history of the Earth occurred, disappearing, among others the most spectacular animals of all the times: the dinosaurs. The mass extinction was catastrophic and affected more than half of the species living at the end of the Cretaceous. The study of fossil marine microorganisms such as the planktonic foraminifera allows to evaluating the intensity of this extinction event. This biological crisis was probably caused by the impact of an asteroid on the continental platform of the Yucatan Penninsula.

Keywords: planktonic foraminifera, impact, C/T boundary, Mexico, mass extinction.

Referencias

1. Sheehan, P. M., Fastovsky, D. E., Hoffman, G. R., Berghaus, C. B. y Gabriel, D. L. Sudden extinction of the dinosaurs: latest cretaceous, upper great plains. *Science*, 254: 835-839.
2. Berggren, W. A. Biostratigraphy, planktonic foraminifera and the cretaceous-tertiary boundary in Denmark and southern Sweden. *Proceedings of XXI International Geological Congress, Copenhagen, 1960*; 5: 181-192.
3. Luterbacher, H.P. y Premoli Silva, I. Biostratigrafía del límite Cretáceo-Terciario nell'Appennino Centrale. *Rivista Italiana di Paleontologia e Stratigrafia*. 1964; 70(1): 67-128.
4. Alvarez, L.W., Alvarez, W., Asaro, F. y Michel, H.V. Extraterrestrial cause for the Cretaceous-Tertiary extinction. *Science*. 1980; 208: 1095-1108.
5. Smit, J. y Hertogen, J. An extraterrestrial event at the Cretaceous-Tertiary boundary. *Nature*. 1980; 285: 198-200.
6. Molina E., Arenillas I. y Arz J.A. Mass extinction in planktonic foraminifera at the Cretaceous/Tertiary boundary in subtropical and temperate latitudes. *Bulletin de la Société Géologique de France*. 1998; 169(3) 3: 351-363.
7. Keller, G., Stinnesbeck, W. y López-Oliva, J.G. Age, deposition and biotic effects of the Cretaceous/Tertiary boundary event at Mimbral, NE Mexico. *Palaios*. 1994; 9: 144-157.
8. Hildebrand, A.R., Penfield, G.T., Kring, D.A., Pilkington, M., Camargo, A., Jacobsen, S.B. y Boynton, W.V. Chicxulub Crater: A possible Cretaceous/Tertiary boundary impact crater on the Yucatan Peninsula, Mexico. *Geology*. 1991; 19: 867-871.
9. Penfield G. T. y Camargo, A. Definition of a major igneous zone in the central Yucatan platform with aeromagnetism and gravity. *Society of Exploration in Geophysicists. 51 Annual International Meeting, Abstracts and Biographies*. Los Angeles, 1981; 51: 37.
10. Don Davis, [http://:impact.arc.nasa.gov/gallery/ac91-0193.jpg](http://impact.arc.nasa.gov/gallery/ac91-0193.jpg)