

**REAL ACADEMIA DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS,
QUÍMICAS Y NATURALES DE ZARAGOZA**

DISCURSO DE CONTESTACIÓN POR EL

Ilmo. Sr. D. JUAN PABLO MARTÍNEZ RICA

ACADÉMICO NUMERARIO



ZARAGOZA

2016

Excelentísimo Sr. Presidente

Excelentísimos e Ilustrísimos Sres. Académicos

Señoras y Señores

Otra vez debo dar las gracias a esta Academia por concederme el honor de dar la bienvenida en su nombre a un nuevo miembro de la casa. He aceptado este honor con algún recelo, motivado principalmente por el temor de mi insuficiencia y el alto grado de especialización del nuevo académico. Pero aparte de la obligación que tiene todo académico de aceptar los encargos que le hace la institución, debo indicar que con el recelo se mezcla el placer de escuchar a un experto hablar de un tema que, en general, puede considerarse marginado en nuestra experiencia científica y social.

En efecto, del mismo modo que no es de buen gusto hablar de la muerte propia o ajena, no está de moda hablar del final, la extinción o la desaparición de algo. En ciencia interesa mucho más hablar del origen del Universo, la Tierra o la vida, que de su posible —quizás seguro— final, y así, se han dedicado muchas más páginas, cientos de veces más, a los primeros temas que a los segundos. El autor de la primera obra ampliamente difundida sobre la evolución biológica, Charles Darwin, la tituló “*El Origen de las Especies*”, y habló muy poco en ella o en sus otras obras, de la extinción brusca de especies o grupos más amplios. Tanto su primer libro, sobre los arrecifes coralinos, como el último, sobre la evolución del suelo por la acción de las lombrices y otros organismos edáficos, se centran en el origen de determinadas formaciones geobiológicas, y no en su destrucción y desaparición, que hoy lamentablemente constatamos en muchos casos.

No es así en nuestra Academia. El tema de la extinción de las especies biológicas ya ha sido tratado en distintos trabajos de la misma, y especialmente por el propio Dr. Molina en su trabajo premiado por la Academia en 2007, al que él mismo se ha referido en su discurso, y también por la monografía de nuestro Académico Correspondiente, el Profesor Leandro Sequeiros, titulada “*La extinción de las especies biológicas: Construcción de un paradigma científico*”. Pero el enfoque del Profesor Molina, que aquí nos presenta, es menos general y más preciso que el de Sequeiros, centrándose en la descripción e interpretación detallada de los eventos de extinción recientes, y basándose en una rica colección de datos micropaleontológicos que proporcionan suficientes elementos para descubrir las pautas temporales de dichos eventos, y deduciendo de dichas pautas las causas y los modos de los mismos.

Así pues, esta Academia no ha rehusado, sino al contrario, las investigaciones sobre los procesos de extinción, al menos en el ámbito paleontológico, pues tales procesos tienen en si mismos un considerable interés científico. Luego señalaremos la extraña coincidencia que se da en la estructura general de las pautas de extinción a todos los niveles de las escalas geográfica, temporal y taxonómica. Y es precisamente esta coincidencia la que me ha llevado a elegir el tema de mi respuesta, centrándolo en los agentes de extinción más mortíferos pero menos frecuentes. Intento compensar así el carácter ominoso de los eventos de extinción comentados, con el alivio de su baja probabilidad.

El Profesor Molina es micropaleontólogo, y se ha especializado en paleontología de foraminíferos, y no de todo el registro fósil, sino solamente de las especies y grupos post-jurásicos. Como su predecesor en la posesión de la medalla que hoy recibe, se ocupa de un grupo aparentemente poco atractivo, o que por lo menos no despierta la fascinación y el interés – casi cabría hablar de “dinomanía” – que despiertan los grandes reptiles mesozoicos. Estos últimos quizás sean más atractivos para el gran público, que desconoce incluso la existencia de los foraminíferos, pero no para las compañías petrolíferas, que en parte dependen de los micropaleontólogos para llevar a cabo con eficacia sus prospecciones. El nuevo académico podría haber elegido este camino y colaborar con alguna compañía prospectora. No cabe duda de que en tal caso su contribución al desarrollo de la ciencia hubiera sido bastante menor, pero sus ingresos, por el contrario, mucho mayores.

La elección de la micropaleontología como especialidad tiene sentido porque permite un rendimiento científico notable. Los paleontólogos de macrofósiles, si tienen suerte, pueden esperar el hallazgo de unos pocos fragmentos óseos, rara vez un esqueleto completo, en un yacimiento determinado. Los micropaleontólogos obtienen miles de caparazones completos en cada sondeo, y pueden caracterizar, no sólo a los individuos o las especies halladas sino también el ecosistema en que vivieron, incluyendo sus rasgos abióticos. Y pueden detallar las pautas de extinción a lo largo de una cronoestratigrafía que puede ser muy breve. Complementado con los análisis de los restos de otros grupos de microfósiles con caparazones silíceos, calcáreos u orgánicos (radiolarios, diatomeas, cocolitofóridos, ostrácodos, dinoflagelados, esporas y polen), el micropaleontólogo puede establecer un retrato bastante aproximado del desarrollo de un evento de extinción y de sus causas y condiciones. Esta, junto con las influencias de sus profesores, a quienes ha mencionado al comienzo de su discurso, es la clave de la elección de la especialidad de micropaleontología por parte del Dr. Molina. Y aunque su carrera científica se desarrolla también en otros ámbitos, aquí comentaré brevemente tan solo los aspectos relacionados con esta especialidad.

El primer contacto del profesor Molina con la micropaleontología tuvo lugar en la Universidad de Granada, en 1974, cuando era todavía estudiante de Geología y comenzaba a contemplar la preparación de su tesis de licenciatura, que presentó al año siguiente, recién licenciado. También su tesis doctoral, de 1979, se centró en ese tema. Cuando se doctoró, en 1979, llevaba ya cuatro años trabajando como profesor ayudante de clases prácticas de micropaleontología. A poco de doctorarse, y aconsejado por Leandro Sequeiros, se trasladó a la Universidad de Zaragoza, donde ha desarrollado su carrera científica hasta la actualidad.

A su llegada a Zaragoza, Molina organizó un grupo de investigación especializado en micropaleontología de foraminíferos, y asumió la docencia en esta especialidad para la asignatura correspondiente de la licenciatura en Ciencias Geológicas, impartiendo clases de micropaleontología prácticamente cada año desde 1979, si bien ha dado también clases de Paleontología general y de otras asignaturas. La actividad docente se ha concretado además en la dirección de una docena de tesis de licenciatura y otras tantas tesis doctorales, de cuatro tesis de estudios avanzados y de una tesis de máster. Todos estos trabajos salvo uno versan sobre micropaleontología, generalmente de foraminíferos.

Los resultados de sus investigaciones se han plasmado en numerosas publicaciones. Si nos limitamos a los trabajos propiamente científicos y centrados en su especialidad, 265 si se incluyen los capítulos de libros y los artículos divulgativos, más del 70 % tratan de micropaleontología o de los eventos de extinción analizados a partir de microfósiles. En consecuencia el Dr. Molina, junto con sus alumnos y colaboradores, se ha convertido en un referente sobre micropaleontología en España. Ha publicado un libro de texto de micropaleontología para la enseñanza universitaria (Molina, 2002, 2004), que aborda ahora su tercera edición, ha pertenecido al comité editorial de distintas revistas científicas, entre ellas la *Revista Española de Micropaleontología* y la francesa *Revue de Micropaléontologie*, ha sido miembro, secretario y en algunos casos presidente de distintas comisiones internacionales sobre límites estratigráficos, etc.

Como puede leerse en la completa introducción histórica al manual de micropaleontología recién citado, esta especialidad se implanta con fuerza en nuestro país a partir de 1960 y es cultivada hoy por cerca de medio centenar de especialistas preferentemente ligados a las universidades. Entre los más destacados, y esto, como es lógico, no lo dice esa introducción, figura el Dr. Molina. Su carácter de referente en este tema tiene una consecuencia comprensible. Muchas de las publicaciones españolas sobre el tema o bien son de nuestro nuevo académico, o se deben a sus colaboradores, o, finalmente, se ba-

san en los trabajos de uno y otros, citándose en ellos ampliamente las publicaciones de Molina y sus discípulos. Esto explica cierta obligada proporción de autorreferencias en la bibliografía de sus trabajos. De hecho casi todos los trabajos españoles recientes sobre este tema o sobre el tema de las extinciones citan profusamente al profesor Molina. Él mismo, sin embargo, siempre ha reconocido y ponderado el trabajo de sus predecesores en este campo, y en particular el de Guillermo Colom, pionero de la micropaleontología en España y especialista, al igual que Molina, en foraminíferos. La referencia a Colom, a cuyo homenaje Molina ha dedicado algunas publicaciones, me es obligada, y aprovecho la circunstancia para señalar de pasada lo mucho que aprendí de sus obras ecológicas, y cuanto admiré sus excelentes dibujos y la extensión y profundidad de sus ideas (aunque ¡ilusio de mí! en una ocasión, recién licenciado, me atreví a competir con él).

La especialidad del Dr. Molina está acotada temporalmente: él, como casi todos los expertos en foraminíferos fósiles, trabaja sobre todo en especies cenozoicas, con algunas contribuciones también sobre las del periodo Cretácico. No es que el grupo se originase en ese periodo, pues se conocen foraminíferos fósiles del Carbonífero e incluso del Cámbrico, pero antes del Jurásico los yacimientos son demasiado antiguos, sus microfósiles han sufrido a menudo profundas transformaciones por bioturbación, compresión, hidratación y oxidación, y sus especies reconocibles no son tan numerosas, llevando a deducciones menos fiables. Esto significa que las conclusiones derivadas de muestras muy antiguas, de más de 150 millones de años, son de menos valor para establecer pautas en los eventos de extinción.

Queda por comentar un aspecto de la obra del Dr. Molina que parece un tanto alejado de la micropaleontología y, hasta cierto punto, de la investigación científica básica, y es su dedicación combativa en pro de la racionalidad de las disciplinas científicas y la consiguiente posición crítica hacia las llamadas “pseudociencias”, principalmente el creacionismo “científico”, el diseño inteligente y el negacionismo del cambio climático. Normalmente las instituciones científicas serias ignoran estas autodenominadas “ciencias alternativas o complementarias”, como no merecedoras siquiera de la atención de un científico, pero algunas universidades han permitido intentos de impartir enseñanza en campos discutibles.

En el ámbito de la paleontología, como en el de otras ciencias, no faltan, por cierto los fraudes o las investigaciones chapuceras. El Dr. Molina se ha ocupado a menudo de estos pretendidos hallazgos científicos, no para desacreditarlos, sino para señalar el enfoque y metodología adecuados para una investigación científica correcta y fundamentada. Hay que decir que estas intervenciones le han acarreado a veces críticas ingratas por parte de

autores demasiado encasillados en sus ideas, pero también la satisfacción de ver eliminada la enseñanza de algunas pseudociencias.

Impactos extraterrestres y procesos de extinción.

El desarrollo de un comentario al discurso del Dr. Molina me ha planteado bastantes problemas. Ya he indicado anteriormente el motivo que me ha llevado a elegir el tema de las extinciones causadas por impactos de cuerpos celestes, en lugar de tomar otros más afines a mi especialidad. Obviamente, no puedo ni debo comentar los detalles de ese discurso, lo que sólo podría hacer un micropaleontólogo como él. Y otros aspectos más próximos, como la llamada “Sexta Extinción” o los factores ecológicos de las extinciones locales, o bien ya han sido tratados por el propio Dr. Molina en el discurso precedente, por Sequeiros en el trabajo ya mencionado, o en otras publicaciones y conferencias realizadas por la Academia, o bien se refieren a procesos de extinción de fondo sin carácter catastrófico.

En lugar de ello he optado por prolongar hacia atrás la exposición de dicho discurso incluyendo en la misma los eventos de extinción catastrófica anteriores al límite Cretácico/Paleógeno (K/Pg), a pesar de la dificultad comentada pocas líneas atrás. De entre ellos se comentarán únicamente aquellos que pudieran ser debidos a impactos de cuerpos extraterrestres. Ello requiere una breve introducción astronómica que se sitúa fuera de mi especialidad, pero en la que espero no disparatar, ya que se ha beneficiado del consejo de colegas expertos¹. Discutiré también brevemente los efectos de un impacto de este tipo, para pasar luego a comentar los principales eventos de impacto en la Tierra y sus eventuales consecuencias sobre la biosfera y sobre la evolución de la vida.

El modelo actualmente aceptado de formación y evolución del sistema solar es el de acreción de una nebulosa protoplanetaria que se transforma en un disco aplanado de polvo y gas con una protoestrella en su centro. El gas y el polvo del disco se aglomeran en partículas y núcleos de tamaño creciente, hasta formar los llamados planetesimales, que finalmente se integran en los ocho planetas conocidos. Este modelo, que es una versión modernizada y cuantificada de la vieja hipótesis de Kant-Laplace, fue propuesto inicialmente por Victor Safronov en 1969, y presenta todavía algunos puntos difíciles pero es el que goza de más consenso por parte de astrofísicos y planetólogos. El proceso de acreción implica la disminución del número de planetesimales y asteroides a lo largo del tiempo, de

¹Agradezco vivamente el consejo de nuestro Presidente, Antonio Elipe, en este terreno.

manera que la probabilidad de impacto de alguno de estos cuerpos con la Tierra u otros planetas ha ido también bajando de manera correspondiente.

Los comienzos de la vida en la Tierra constituyen un problema aún no aclarado totalmente. La existencia de vida microbiana estable y permanente en la Tierra parece demostrada desde hace 3.500 millones de años, pero existen huellas de vida muy anteriores, y datos recientes sugieren que las primeras estructuras biológicas pudieron aparecer hasta 600 millones de años antes, o sea, en medio del llamado Gran Bombardeo (Bell et al., 2015). Puesto que este episodio implicó la repetida fusión de la naciente corteza terrestre, y es por lo tanto incompatible con la vida, la existencia de huellas biológicas anteriores se hace difícil de explicar. La única manera de conciliar estos datos es suponer que la vida apareció en nuestro planeta en varias ocasiones, y fue repetidamente eliminada para volver a surgir de nuevo cuando las condiciones lo permitían.

El Gran Bombardeo, cuyas huellas, no borradas por los agentes atmosféricos ni ocultas por el mar, son todavía claramente perceptibles en los numerosas cráteres de impacto que salpican la Luna, parece terminar de manera relativamente brusca hace unos 3.700 millones de años. Probablemente la tasa de impactos de cuerpos extraterrestres en nuestro planeta experimentó un descenso marcado en un tiempo relativamente breve, quizás en unas decenas de millones de años, pero el sistema solar no quedó vacío de asteroides y cometas, y los impactos continuaron ocurriendo durante los eones posteriores, si bien disminuyendo en frecuencia a medida que el número de objetos susceptibles de choque con la Tierra iba decreciendo. Los impactos posteriores no destruyeron por completo la corteza terrestre, y diversas formas de vida bacteriana pudieron sobrevivir a los peores de ellos. El número y la recurrencia de los impactos posteriores al Gran Bombardeo nos son desconocidos, pero claro está que dependen en gran manera del número de objetos presentes en el sistema solar que son susceptibles de ser desalojados de su órbita por alguna causa y tomar una trayectoria de colisión con nuestro planeta.

Para estimar el número de objetos que formaban el sistema solar hace 3.700 millones de años puede servir el de objetos hoy presentes en el mismo, cuyo conocimiento ha ido mejorando con el tiempo. En la época de Copérnico el sistema solar conocido, sin contar los cometas, constaba únicamente de seis planetas más la Luna y el Sol. Galileo añadió los cuatro satélites principales de Júpiter en 1610, y al final del siglo XVII el total de cuerpos conocidos era de 17, de 23 al final del siglo XVIII y de 492 (de los cuales 463 eran asteroides) en 1900.

Stephen Dole presentó en 1964 una gráfica de la distribución de las masas de los objetos del sistema solar que sólo descendía hasta poco más de los 12 km de diámetro, y suponía que el número de los cuerpos de ese tamaño sobrepasaba los 3.100, pero en aquellos tiempos buena parte de los objetos menores del sistema solar eran desconocidos todavía. De hecho el número de asteroides descubiertos era entonces de unos 2.000, no se conocía el cinturón de Kuiper, y la nube de Oort, aunque postulada por el astrónomo que le dio nombre en 1950, era una construcción teórica sin base observacional. Dado que hoy se conocen más de 500.000 asteroides en el cinturón interior, y que este número se ve ampliamente sobrepasado por el de cometas, planetas enanos y asteroides en el cinturón de Kuiper, cuya población apenas se empieza a estudiar ahora, no es arriesgado suponer que al menos 50.000 y quizás millones de entre ellos alcanzan o superan los 10 km de diámetro. Por último, en la nube de Oort, más alejada y compuesta principalmente por planetesimales helados, cometas y protocometas, ni el número ni la distribución de objetos se han calculado de modo fiable, pero el primero puede estimarse en miles de millones.

Con sus propios datos, Dole calculó también la probabilidad de un choque asteroidal o un evento catastrófico similar, y estimó asimismo los periodos de retorno promedio para impactos de distinta intensidad. Considerando que los efectos catastróficos globales, traducibles en episodios de extinción biológica masiva se dan en promedio por el choque de objetos de al menos 5 km de diámetro (una estima muy conservadora), con energía cinética media igual a 50 millones de megatones, los datos de Dole conducen a un periodo de recurrencia para impactos de extinción asteroidal masiva de 100 millones de años, o sea unos cinco impactos durante el fanerozoico. El hecho de que sean precisamente cinco los grandes eventos de extinción masiva registrados durante ese periodo podría servir de apoyo circunstancial a la estimación de Dole. Sin embargo el periodo de recurrencia se ha revisado posteriormente a la luz del gran incremento en el número de objetos descubiertos como parte del sistema solar, y se consideró después que este periodo puede rebajarse a 60 millones de años para objetos de diámetro superior a 10 km y a 10 millones para los de diámetro superior a 5 km (Milne et al., 1982). Las estimaciones más recientes dan frecuencias superiores o inferiores, aunque los autores señalan que sus conclusiones pueden errar en un factor de 3 (por lo tanto de 20 a 180 millones de años, Morrison, 2006) pero la cifra antes indicada, que por otra parte coincide con los resultados de la mayoría de las simulaciones por ordenador, es suficiente para explicar el número de cráteres de impacto que aún existen más o menos borrados sobre los continentes.

Tras el periodo Hadeano la Tierra no experimentaría más impactos con cuerpos planetarios, quizás tampoco con grandes asteroides o planetas enanos, pero en el sistema solar

quedaban todavía bastantes cuerpos de dimensiones menores, con diámetros de varias decenas o centenares de kilómetros. Durante el periodo Arqueano al menos seis de esos cuerpos chocaron con nuestro planeta, y probablemente muchos más de tamaño menor. Extensas zonas de Australia y Sudáfrica contienen minerales que parecen derivar de materia eyectada por impactos asteroidales datados hace 3.470, 3.260, 3.240, 2.630, 2.560 y 2.480 millones de años (Glikson, 2010). Para el segundo de ellos (Barberton Greenstone Belt, en Sudáfrica) el tamaño del cuerpo responsable del impacto se estima entre 56 y 80 km de diámetro. Naturalmente, es imposible conocer los efectos que tales impactos pudieron tener sobre la nascente biosfera. La corteza terrestre se fundiría en parte, pero distintos procariotas pudieron persistir cerca de salidas hidrotermales poco afectadas o en las grietas de rocas más profundas: la hasta hace poco desconocida y hoy llamada “biosfera profunda” está integrada por procariotas que viven desde el fondo marino y la superficie terrestre hasta los 500 y 5.000 m de profundidad respectivamente, por lo que no es difícil suponer que en los remotos tiempos del Arqueano sucediese lo mismo, al menos bajo el fondo de los nacientes océanos.

El final del Arqueano y el principio del Proterozoico vienen marcados también por catástrofes planetarias. Fue en estos tiempos cuando la proliferación de procariotas fotosintéticos, presumiblemente cianobacterias, comenzó a vaciar la atmósfera terrestre de dióxido de carbono y a sustituir este gas por oxígeno. Aunque posteriormente casi toda la vida terrestre se basaría en la utilización de este gas, la primera acumulación de oxígeno en la atmósfera debió resultar tóxica para la mayoría de los organismos anaerobios, que entonces integraban la casi totalidad de la biosfera. Este episodio se conoce como el Gran Envenenamiento por Oxígeno, y resultó en una crisis de diversidad imposible de evaluar hoy, pero que sin duda fue importante en la exigua biosfera microbiana de entonces.

Pocos impactos por objetos extraterrestres durante el proterozoico han podido ser detectados y datados. A diferencia de lo sucedido durante el arqueano, el número de impactos era más bajo desde el fin del Gran Bombardeo, pero sus huellas se han conservado mejor en una corteza mucho más joven. Se han hallado restos de cráteres de impacto en una docena de puntos que se han podido datar en el Proterozoico, es decir, entre 2.500 y 570 millones de años, pero esto debe ser solamente una parte mínima de los que se produjeron en realidad. Solo cuatro de esos puntos (Vredefort en Sudáfrica, Sudbury en Canadá, Lycksele en Suecia y Acraman en Australia, ya del Proterozoico final), fueron producidos por impactos de cuerpos de 10 o más km de diámetro, capaces de causar una crisis de extinción global, cuya importancia es hoy imposible de evaluar.

Efectos de un impacto asteroidal

El evento de extinción del límite K/Pg, tan detalladamente descrito en el discurso del Dr. Molina, se debió, al parecer, al choque con la Tierra de un gran meteorito, que mejor debería ser llamado asteroide o cometa pues se le calculan unos 10 km de diámetro. Claro está que la energía liberada por un choque de este tipo no depende solamente de la masa involucrada, sino especialmente de la velocidad de impacto, y ésta a su vez del ángulo del impacto y de los movimientos relativos de la Tierra y del objeto impactante. En principio la energía cinética liberada en forma de calor, pero asimismo en forma mecánica, es igual a la mitad de la masa del objeto por el cuadrado de su velocidad, y salvo en los casos de objetos muy pequeños y frecuentes se mide en kilotones o megatones.

Los efectos de un impacto de este tipo se presentan ya en el momento del choque. La brusca transformación en calor de una altísima energía cinética libera una energía térmica similar a la producida por 10 millones de bombas termonucleares de rendimiento alto (6 megatones) o 500 millones de bombas atómicas como la caída en Hiroshima (20 kilotones). No toda la energía cinética se transforma en calor, pero éste basta para fundir y vaporizar una parte del meteorito y del suelo impactado. La parte convertida en energía mecánica puede provocar intensos terremotos y un incremento notable del volcanismo a causa de las perturbaciones en la astenosfera terrestre, para crear un cráter que puede tener decenas de kilómetros de diámetro (en el caso del asteroide del límite K/Pg el cráter resultante tiene 170 km de diámetro), para deprimir el suelo en el área de impacto cientos de metros por debajo del área circundante y para arrojar los restos rocosos eyectados del suelo por el choque a distancias muy superiores al radio del cráter. De hecho, y dado que las velocidades de impacto suelen ser superiores a los 20 km/seg, muy por encima de la de escape de la Tierra, el choque puede lanzar parte de los restos al espacio. En el caso de los elementos minerales de pequeño tamaño basta para arrojar cientos de toneladas de ellos a la atmósfera, donde los más pequeños pueden extenderse sobre todo el planeta y llenar la troposfera con una capa de polvo que puede tardar años en sedimentarse.

Es precisamente el efecto del polvo proyectado por la explosión, junto con el hollín y cenizas derivados de los numerosos incendios que la onda térmica provoca, el responsable del llamado “invierno nuclear”, que en este caso sería “invierno meteorítico”, y de la consiguiente extinción masiva. Por supuesto el impacto puede causar una total destrucción directa en el área afectada: si el cráter submarino de Chicxulub tiene 170 km de diámetro la superficie afectada es de más de 22.700 km², la mitad de la de Aragón, y si añadimos

la cubierta por los residuos eyectados del cráter, un diámetro al menos diez veces mayor, y una superficie casi equivalente a la de buena parte de la Europa Occidental. La onda expansiva lleva los efectos destructivos (principalmente arrasamiento de bosques, suministrando abundante material para los incendios) a una superficie igual o mayor, pero son los efectos indirectos, a través del mencionado “invierno meteorítico”, los que alcanzarían un área más extensa, abarcando probablemente todo el planeta.

En el caso del impacto en el límite K/Pg los millones de toneladas de aerosoles proyectados a la atmósfera habrían causado una disminución drástica del calor y la luz solares recibidos en superficie. La temperatura media a nivel del suelo, tras los efectos de la onda térmica, descendería entre dos y cinco grados durante un periodo de ocho meses a tres años. Serían hasta tres años sin primavera ni verano en los que moriría por el frío una significativa fracción de las plantas terrestres. Pero mucho más graves serían las consecuencias del oscurecimiento atmosférico, que limitaría y hasta suprimiría la fotosíntesis durante varios años eliminando de paso a los animales herbívoros, y en consecuencia a los carnívoros, que perecerían de hambre. Los organismos carroñeros y una gran parte de los descomponedores podrían sobrevivir durante unos meses, pero al cabo de un año casi toda la biomasa recién muerta habría desaparecido, mientras que la biomasa acumulada en forma de madera o huesos, persistiría más tiempo y podría sostener quizás a pequeñas poblaciones de organismos puramente xilófagos.

Si el objeto que impacta lo hace en el océano, lo cual dada la extensión relativa de tierras y mares tiene una probabilidad actual del 70 %, mayor en el pasado, los efectos serían algo distintos. La emisión de aerosoles opacos y el consiguiente invierno meteorítico serían menos intensos. A cambio se producirían ingentes emisiones de vapor de agua a la atmósfera, lo que aumentaría la pluviosidad y sobre todo los fenómenos climáticos extremos, como ciclones, huracanes y grandes tormentas. Además el impacto directo en el mar causaría uno o varios maremotos de gran magnitud que arrasaría las zonas costeras. Probablemente la extinción de especies sería mucho más limitada, y quizás sólo el 30 % de los impactos, los ocurridos en tierra firme, podrían dar lugar a extinciones masivas y globales. El artículo de Turco et al. (1983) presenta un análisis completo de las consecuencias de la explosión simultánea de numerosas cabezas nucleares, que difiere del escenario de un gran impacto principalmente por la mayor dispersión de las explosiones y por la existencia de intensas ondas de radiación gamma y de abundantes residuos radiactivos.

Los eventos de extinción por causas extraterrestres en el Fanerozoico.

El Fanerozoico ocupa los últimos 540 millones de años de la historia de la Tierra, y sus estratos están mejor conservados y contienen abundantes restos fósiles. Desde su comienzo existen ya organismos multicelulares evolucionados y provistos de caparazones fácilmente fosilizables (trilobites, arqueociátidos, etc). La corteza terrestre se ha expandido y engrosado, ocupando a comienzos del Cámbrico el 81 % de la extensión que ahora tiene. Las crisis de extinción masiva en este tiempo se han asociado con distintos procesos cuyas huellas pueden hallarse con mayor facilidad que los de los tiempos precámbricos. Y esto quiere decir que en muchos casos se ha postulado como causa desencadenante de la crisis algún mecanismo geológico o climático, sin necesidad de invocar impactos extraterrestres.

Con todo, algunos autores han invocado el choque de cuerpos extraterrestres con la Tierra para explicar distintos eventos de extinción. Esta causa se ha propuesto para los siguientes eventos: Pleistoceno final y Dryas reciente, Eoceno/Oligoceno, Eoceno medio/Eoceno superior, Paleoceno/Eoceno, Cretácico/Paleógeno, Triásico/Jurásico, Pérmico/Triásico, Devónico/Carbonífero y Ordovícico/Silúrico. Esta lista no implica que se acepte hoy de manera general que los impactos de objetos extraterrestres son los causantes de las sucesivas crisis de diversidad de la tierra, con extinciones masivas y bruscas de numerosas especies de animales y plantas. De los nueve eventos de extinción relacionados, solamente en un caso, el del límite K/Pg la intervención de un impacto asteroidal parece probada (por cierto, con la participación del equipo del Dr. Molina en las investigaciones). En otros casos esa causa se ha descartado del todo, mientras que en la mayoría el choque con un objeto extraterrestre no se excluye o incluso puede aceptarse como una causa concomitante, pero se prefieren explicaciones alternativas. Existen otros eventos de extinción masiva para los que ningún autor ha invocado la intervención de un impacto asteroidal o cometario..

Impactos asteroidales y catastrofismo evolutivo

La crisis de extinción en el límite cretácico-terciario es la más conocida y estudiada, y el descubrimiento por Louis y Walter Álvarez de que pudo ser causada por el impacto contra la Tierra de un cuerpo extraterrestre ha tenido unas repercusiones extraordinarias en las disciplinas relacionadas con el estudio de la evolución orgánica. Como es bien sabido, Charles Darwin, quien sin embargo consideraba a Georges Cuvier uno de sus “dioses”,

se opuso siempre con fuerza a las teorías catastrofistas propugnadas por éste, y aún en mayor grado por su discípulo Alcides d'Orbigny (por cierto, la persona a quien se debe la descripción y primera definición del grupo de los foraminíferos). Darwin veía en las supuestas catástrofes y creaciones sucesivas postuladas por Cuvier una amenaza directa a sus explicaciones gradualistas, heredadas de Lyell, según las cuales cualquier proceso geológico o biológico puede explicarse por acumulación gradual de pequeños cambios casi imperceptibles a lo largo de enormes espacios de tiempo. Los trabajos de los Álvarez, padre e hijo, así como el ya citado artículo de Turco, Sagan y otros sobre el invierno nuclear, consagraron la aceptación de la hipótesis del impacto, y aunque ésta fue muy discutida inicialmente y aún es rechazada como causa principal por algún científico, puede considerarse hoy plenamente admitida.

La postura de Darwin en su día estaba plenamente justificada. Cuvier conocía, por supuesto, la existencia de catástrofes naturales importantes, tales como erupciones volcánicas, inundaciones, terremotos, etc, pero creía que algunas de tales catástrofes habían sido mucho mayores en el pasado, y que de ellas habían resultado extinciones masivas. Darwin, en cambio, conocía los mismos tipos de catástrofes naturales, pero pensaba que éstas habían tenido siempre la misma importancia, eran de carácter local, y no implicaban la extinción de ninguna especie. Según escribió en *El Origen de las Especies*,

“Las especies son producidas y exterminadas por causas que actúan lentamente... y la más importante de estas causas de modificación orgánica es casi por completo independiente de los cambios... en el entorno físico, y es concretamente la relación mutua entre distintos organismos, pues la mejora de un determinado organismo entraña bien la mejora, bien la desaparición de otros organismos”.

Por otra parte Darwin veía los postulados de Cuvier con recelo, primero porque se oponían a su creciente agnosticismo, invocando destrucciones extraordinarias (de las cuales es fácil dar el paso conceptual a destrucciones extranaturales) y peor aún, por las subsiguientes creaciones que debían repoblar el mundo destruido, y estas sí, solo podían concebirse como sobrenaturales. Lo que ni Cuvier ni Darwin podían imaginar es que podía darse una extinción global como consecuencia del choque de un cuerpo celeste con la Tierra, y que esta catástrofe podía conllevar la extinción de numerosas especies y grupos. Si Cuvier hubiera imaginado este suceso lo habría puesto como ejemplo del tipo de catástrofes que él postulaba, y si lo hubiera conocido Darwin lo hubiera puesto en duda o hubiera dicho

que se trataba de una explicación errónea de las lagunas presentadas por un registro fósil incompleto.

Aunque el neocatastrofismo surgido del descubrimiento de Alvarez no rehabilitó las viejas ideas combatidas por Darwin, sí abrió la puerta a la posibilidad de contar a lo largo de la evolución con eventos de ruptura de la biosfera, que anulan o reconducen de manera drástica todo el lento trabajo de la selección natural. Si se dio al final del Cretácico un evento de extinción por impacto, bien pudieron darse otros similares mucho tiempo antes o después, con consecuencias iguales o peores para la vida. De hecho, como ya se ha indicado, se dieron eventos de extinción masiva en tiempos anteriores al periodo jurásico, por lo menos una veintena de ellos, con reducción de las especies biológicas de entre un 10 % y un 90 %.

Principales eventos de extinción

Hace poco más de 200 millones de años tuvo lugar el último de los eventos de extinción masiva anteriores al del Cretácico/Paleógeno. Este evento coincide con la transición entre los dos primeros periodos de la era Mesozoica (Triásico/Jurásico) y con el comienzo de la fragmentación de Pangea, el supercontinente del Paleozoico final. En dicho episodio se extinguieron muchas especies, del 70 al 75 %, un porcentaje mucho menor que el de los eventos de extinción que inician y terminan la era Mesozoica. Entre los vertebrados terrestres, que en aquellos tiempos se reducían a los anfibios y a los reptiles, se extinguieron 26 de las 33 familias de la época, si bien muchas habían desaparecido ya antes del comienzo del periodo Jurásico. Después de este evento la tierra firme fue recolonizada por otras especies de reptiles, lo que dio lugar al surgimiento y expansión de los dinosaurios.

El impacto de un cuerpo extraterrestre contra la Tierra es una de las causas postuladas como desencadenante de este evento de extinción. Existen indicaciones indirectas de este impacto, pero falta la prueba principal del mismo, la presencia de un cráter de impacto que pueda datarse en aquellas fechas. Los cráteres de impacto que hoy subsisten casi borrados son demasiado pequeños para explicar una extinción global y además no coinciden temporalmente con la transición Triásico/Jurásico, sino que la preceden en unos 10 millones de años, un tiempo excesivo para una crisis que se supone duró mil veces menos. Se han postulado por ello causas alternativas de la crisis de extinción.

Por ejemplo se han achacado las extinciones de esta época a cambios climáticos profundos, fluctuaciones del nivel del mar o a una progresiva acidificación del agua marina, pero todos ellos son cambios graduales que no se compaginan bien con el carácter brusco del evento. También se ha invocado un incremento del volcanismo global, y esta parece ser la causa más probable, aunque no existe una evidencia segura y en todo caso, también aquí el volcanismo generalizado podría ser consecuencia de un impacto meteorítico, y a su vez ser causa de cambios atmosféricos profundos que fuesen los responsables directos de la extinción.

El más importante de los eventos de extinción masiva anteriores al del límite K/Pg es el correspondiente a la transición permotriásica, que señala el final de la era paleozoica y el principio de la mesozoica. Este episodio, que ha sido llamado “la Gran Mortandad” tuvo lugar hace 252 millones de años, y desencadenó una crisis de extinción que eliminó el 96 % de las especies marinas, incluyendo familias completas de foraminíferos, y el 70 % de las de vertebrados terrestres, que en aquel tiempo, hay que reconocerlo, no eran muchas. También desaparecieron más del 80 % de los géneros de insectos, la única gran extinción conocida para este grupo que se vio poco afectado por la extinción del Cretácico. En resumen, la pérdida de biodiversidad del planeta fue la mayor de las conocidas, y la recuperación ulterior requirió mucho tiempo, quizás varios millones de años, para alcanzar una situación similar a la que precedió a la crisis.

A diferencia del evento de extinción del final del Cretácico, el del final del Pérmico parece no haber sido súbito, sino que puede descomponerse en varias fases que abarcaron unos diez millones de años. Por este motivo, y también por su mayor antigüedad, los factores causantes de la extinción están menos claros, y probablemente son múltiples, combinándose a lo largo de la crisis. Casi todas las causas invocadas para explicar los episodios de extinción masiva pueden haber operado en la extinción del Pérmico final, y así los incendios generalizados de lechos de carbón o de gas, el volcanismo generalizado, un efecto invernadero desbocado que pudo ser debido a una inmensa y brusca emisión de metano, periodos de anoxia en mares y océanos, junto con distintos cambios climáticos graduales que pudieron sobrepasar determinados umbrales en algún momento etc., se han postulado como causas. También se ha supuesto el impacto de uno o más cuerpos extraterrestres (Kaiho et al., 2001), sobre todo para la fase final de la crisis, impacto que podría estar relacionado con las causas anteriores. Por ejemplo, el impacto podría provocar el volcanismo generalizado y los incendios, la consiguiente destrucción de la vida marina podría haber provocado los periodos de anoxia, etc. Sin embargo, aunque se han esgrimido indicios de un impacto asteroidal en esa época, distan de constituir pruebas

decisivas. Hay que tener en cuenta que el movimiento de las placas litosféricas renueva la totalidad del suelo marino cada 200 millones de años aproximadamente, de manera que, para posibles impactos que hayan tenido lugar en el mar es imposible encontrar la prueba decisiva (un cráter de impacto datable) en eventos que tengan una edad mayor que esta. A pesar de ello se ha pretendido incluso localizar el lugar del supuesto impacto.

A causa de los incendios generalizados y de la liberación de metano en el fondo de los mares, también relacionada con la anoxia, se habría producido entonces un efecto invernadero muy superior al provocado hoy por el hombre, aunque menos brusco. Se supone que la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera, que hoy supera ya las 400 partes por millón, alcanzó un nivel cinco veces superior, y su acción fue complementada por la elevada concentración de metano. La temperatura atmosférica media sobrepasó en 8°C la existente antes de la crisis, y la aridez se generalizó en todo el planeta. Entre los taxones superiores que desaparecieron por completo en la crisis del Pérmico se cuentan los últimos trilobites, ya muy reducidos antes de la crisis, los euriptéridos (artrópodos marinos), los acantodios (una clase de peces placodermos) y los blastoideos (una clase de equinodermos). En cuanto a los microorganismos marinos desaparecieron el 97 % de los géneros de foraminíferos y el 99 % de los de radiolarios. En el caso de los organismos con caparazones calcáreos, como los foraminíferos, la acidificación del océano, que dificultaba la formación de caparazones, pudo ser una causa inmediata de la extinción.

Según los registros polínicos y de esporas, las plantas terrestres parecen haber sido menos afectadas que los animales por las crisis de extinción, sobreviviendo a ellas la mayoría de las familias, aunque en la del Pérmico se perdieron el 50 % de las especies. La capacidad de resistencia de los granos de polen, las esporas o las semillas enterradas, que pudieron permanecer viables durante muchos años después de una catástrofe repentina, puede explicar esta supervivencia. Pero los ecosistemas paleozoicos desaparecieron casi por completo: como ocurre después de cualquier catástrofe ecológica, las tierras arrasadas fueron ocupadas inicialmente por especies pioneras, generalistas, con una elevada tasa de reproducción y que se expandían en un mundo sin competencia. Así, se estima que *Lystrosaurus*, un género de protomamíferos terápsidos del tamaño de un cerdo, que vivió a principios del Triásico, representaba entonces el 90 % de la fauna de vertebrados terrestres. Llevaría millones de años el convertir estos ecosistemas inestables y simples en ecosistemas complejos, diversificados y estabilizados.

Otra crisis de extinción, la del Devónico final, tuvo lugar entre 360 y 375 millones de años atrás. Se trata, pues, no de una única crisis, sino de una serie de crisis de extinción

que se siguen unas a otras durante unos 15 millones de años y que terminan con el periodo Devónico, dando paso al Carbonífero. Del conjunto de las crisis resultó la pérdida de casi el 20 % de las familias de organismos, la mitad de sus géneros y el 70 % de las especies. Estas estimas han sido revisadas al alza recientemente. En todo caso la vida marina resultó más afectada que la incipiente vida terrestre integrada por plantas y por los primeros insectos.

El acontecimiento es demasiado remoto para establecer sus causas con cierta seguridad. Como en otros eventos de extinción se han invocado también el volcanismo generalizado, los cambios climáticos más o menos súbitos y las fases de anoxia en los océanos, sin excluir el posible impacto de un cuerpo extraterrestre. Para esta última hipótesis existen indicios pero no pruebas, y en concreto, no se han podido encontrar los correspondientes cráteres de impacto, al menos con alguna seguridad.

Una hipótesis alternativa que se ha esgrimido para explicar las causas de esta crisis merece atención por ser específica de este periodo. Al comienzo del periodo Devónico la tierra firme carecía de plantas superiores, que se limitaban a zonas litorales inundadas, carecían de semillas y tenían talla herbácea; al final del periodo existían ya árboles de gran talla, de hasta 30 m de alto, que formaban extensos bosques que cubrían buena parte de los continentes. Estos bosques almacenaban una enorme cantidad de biomasa, a la que correspondía un gran peso de dióxido de carbono retirado de la atmósfera. Además los sistemas radicales de los árboles habían penetrado la capa terrestre superficial y habían formado un gran volumen de suelo, cuyos procesos químicos y cuyas interacciones con el agua de lluvia habían retirado de la atmósfera ingentes cantidades adicionales de dióxido de carbono. Este cambio en la composición de la atmósfera pudo ser suficiente para explicar los cambios climáticos subsiguientes, así como los episodios de anoxia en los océanos.

La escala de las extinciones

Si se ha elegido aquí el escenario de los impactos causados por cuerpos extraterrestres es porque representa un extremo del amplio espectro espacial y temporal en que se desarrollan éstas. Como ha indicado el nuevo académico, los eventos de extinción pueden presentar pautas súbitas o graduales, y éstas últimas pueden ser rápidas o lentas, continuas o interrumpidas. Los eventos de extinción causados por el choque de algún gran cuerpo extraterrestre son súbitos y globales, mientras que la extinción de fondo es un

proceso lento y continuo, de ámbito también global en su conjunto, pero local para cada una de sus manifestaciones.

Tanto en la escala temporal como en la espacial existen muchos niveles intermedios. La mayor parte de los eventos globales de extinción discurren a un ritmo mucho más lento, de unos miles o decenas de miles de años, un parpadeo en todo caso desde el punto de vista geológico, y otros, como las liberaciones masivas de metano o los episodios de vulcanismo generalizado pueden abarcar millones de años. La tasa de extinción de fondo, por su parte, puede ser más o menos intensa, y ha experimentado altibajos a lo largo del fanerozoico. Algunos autores suponen que las grandes extinciones se manifiestan periódicamente, con intervalos que según ellos dependen de fenómenos cósmicos, como el año galáctico de unos 200 millones de años, aunque estas hipótesis no han sido confirmadas en ningún caso. Otros afirman que cuando se incrementa la tasa de extinción durante periodos largos, y numerosas especies o grupos están sometidos a una presión ambiental permanente, basta un acontecimiento catastrófico de cualquier tipo para desencadenar un evento de extinción global.

Hay una tercera escala de variabilidad a considerar, y es la taxonómica. Algunos eventos de extinción afectan a unas pocas especies o a un solo grupo, mientras que otros abarcan una gran variedad de grupos. Hay grupos más sensibles a la extinción y otros que, por diversas razones permanecen estables durante cientos de millones de años. Pero donde mejor se manifiesta el paralelismo entre las pautas de extinción global y las de extinción local es en los ambientes insulares. Por más que Darwin fuese reacio a admitir la importancia de los acontecimientos catastróficos en la extinción de especies, no pudo por menos de admitir su relevancia en algunos casos. En archipiélagos volcánicos, como las Galápagos, donde cada isla está ocupada a menudo por una especie propia (caso de los famosos pinzones de Darwin), está claro que una erupción volcánica potente puede extinguir la especie de forma súbita. Pero si se han formado especies endémicas en una isla ello significa que la misma ha gozado de un periodo de tranquilidad suficientemente largo. Por el contrario, cuando se trata de una isla con volcanes activos y con erupciones recurrentes, separadas por siglos o milenios, carecerá de especies endémicas, y aunque toda la biota sea eliminada por una erupción, la isla será de nuevo repoblada por la misma fauna y flora que tenía antes de la catástrofe, procedente de las islas y tierras vecinas. Tal fue el caso, por ejemplo, de la famosa erupción del Krakatoa, en 1883.

Pero lo más importante es resaltar la semejanza del patrón de muchas extinciones a escala geológica, a escala evolutiva en ambientes insulares, a escala poblacional en grupos

de organismos de la misma especie y hasta a escala individual con la muerte de organismos aislados. A escala geológica ya se ha indicado que con frecuencia una extinción más o menos amplia deriva de la superposición de una tendencia regresiva, con grupos cada vez menos numerosos y diversificados, y una perturbación súbita e intensa con efectos catastróficos. En el poblamiento de las islas suele alcanzarse un punto de equilibrio en el número de especies cuando la tasa de colonización de especies inmigrantes se iguala con la de desaparición de especies residentes (McArthur & Wilson, 1967), pero a veces se dan tendencias regresivas a largo plazo que van rebajando el número de especies en este punto de equilibrio. Basta entonces una perturbación adicional, a menudo inducida por el hombre o por otros invasores, para precipitar el colapso entero de la biota y desencadenar la extinción de muchas especies y la desaparición de otras. El mecanismo parece operar también al nivel de poblaciones más o menos reducidas, en las cuales una tendencia regresiva puede unirse a fluctuaciones aleatorias que pueden llevar a la población más allá del umbral de la desaparición. Es el caso bien conocido de la población de bucardo de Ordesa, por citar un ejemplo aragonés, pero que puede ilustrarse con muchas otras especies en todo el mundo.

Referencias

- Bell, E. A., Bushnik, P., et al., 2015 Potentially biogenic carbon preserved in a 4.1 billion-year-old zircon. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 112 (47) : 14518-14521
- Bottke, W.F., Vokrouhlicky, D., Minton, D., Nesvorný, D., Morbidelli, A., Brasser, R., Simonson, B. & Levison, H., 2012 An Archaean heavy bombardment from a destabilized extension of the asteroid belt. *Nature*, 485 :78-81
- Dole, S. H., 1963 *Habitable Planets for Man*. RAND Corporation. (2a Ed. póstuma de 2007. Existe traducción española de 1968: *Planetas habitables*, Ed. Labor, Barcelona).
- Glikson, A.Y., 2010. Archaean impacts, banded iron formations and MIF-S anomalies: A discussion. *Icarus*, 207, 39-44
- Kaiho, K., Kajiura, Y., Nakano, T., Miura, Y., Kawahata, H., Tazaki, K., Ueshima, M., Chen, Z. and Shi, G.R. 2001. End-Permian catastrophe by a bolide impact: Evidence of a gigantic release of sulfur from the mantle. *Geology*, 29, 815-818
- McArthur, R. H., & Wilson, E. O., 1967 *The theory of Island Biogeography*, Ed. Princeton University Press, Princeton, 215 pp.
- Milne, D., Raup, D., Billingham, J., Niklaus, K., & Padian K. 1982 *The evolution of complex and higher organisms* NASA Ames Research Center, California, 212 pp.
- Molina, E. 2004 (Ed.) .- *Micropaleontología*. Prensas Universitarias de Zaragoza, 704 pp.
- Morrison, D., 2006 .- Asteroid and comet impacts: The ultimate environmental catastrophe. *Phil. Trans. Roy. Soc.: Math., Phys., & Eng. Sci.*, 10, 1098.
- Ohtomo, Y. Et al., 2014 Evidence for biogenic graphite in early Archaean Isua metasedimentary rocks. *Nature Geoscience*, 7(1) :25-28.

- Safronov, V., 1969 *Evolution of the Protoplanetary Cloud and formation of the Earth and the Planets*.
Ed. Nauka Press, Moscú (Trad. al inglés de NASA, 1972, 206 pp.).
- Turco, R.P., Toon, O.B., Ackerman, T.P., Pollack, J.B. & Sagan, C., 1983 Nuclear winter: Global consequences of multiple nuclear explosions. *Science*, 222 (4030): 1283-1292