



Extinção e o Registro Fóssil
Extinction and the Fossil Record

Ibsen de Gusmão Câmara

E-mail: ibsengc@terra.com.br

Recebido em: 30/03/2007 Aprovado em: 27/07/2007

Resumo

As extinções e sua relação com o processo evolutivo conduzem a uma transformação das biotas ao longo do tempo geológico. Neste estudo é apresentada uma síntese dos diversos eventos de extinção documentados no registro paleontológico, demonstrando sua importância para o processo evolutivo.

Palavras-chave: Extinção; Evolução; Registro Fóssil

Abstract

The extinctions and their relationships with the biological evolution allow the changes in the biota patterns through the geological time. In this study is presented a synthesis of the extinction events registered in the paleontological data and their importance to the evolutionary processes.

Keywords: Extinction; Evolution; Fossil Record

1 Introdução

O fenômeno da extinção é uma parte importante do processo evolutivo, sem o qual as biotas permaneceriam estáticas ao longo do tempo geológico. As espécies vivas constituem apenas uma parte ínfima dos diferentes seres que existiram e é possível que algo como 99 por cento de todas aquelas que já viveram estejam extintas; o registro fóssil, com todas as suas imperfeições, somente nos indica uma pequena parcela da imensa variedade de vida que existiu no planeta e jamais poderemos ter uma história completa e perfeita de como ela se desenvolveu.

Embora seja difícil determinarem-se as verdadeiras circunstâncias que levaram à extinção as espécies fósseis, pode-se inferir serem as causas que a provocaram as mesmas existentes nos tempos presentes, resumidas como abaixo indicado:

- Destruição ou degradação de hábitat
- Extermínio em decorrência de extinções anteriores
- Invasão de hábitat por espécies agressivas ou competidoras
- Introdução de elementos patogênicos
- Caça ou matanças deliberadas por ação antrópica
- Eventos catastróficos localizados ou globais

Sejam quais forem as causas de extinção, acima sintetizadas, fatores diversos afetam o risco de sua ocorrência. Alguns deles são de caráter ambiental, como tamanho da área de distribuição da espécie, a capacidade de suporte dessas áreas ou condições climáticas adversas. Outros fatores dizem respeito a características ecológicas de cada espécie, tais como tamanho, fragmentação e densidade da população, e estratégia de alimentação. E, finalmente, o risco também depende da história biológica da espécie, envolvendo duração da gestação, frequência de reprodução, tempo de crescimento e amplitude de duração da vida. Alguns desses fatores são muitas vezes interdependentes. Por exemplo, uma espécie

que tenha ampla distribuição geográfica tende a ter grande população, reforçando assim suas possibilidades de sobrevivência; ou, por outro lado, um grande tamanho corporal geralmente significa longo tempo de gestação e baixa frequência de reprodução, aumentando os riscos de extinção.

2 Fatores Relacionados às Extinções

Os exemplos relativos às causas de extinção e os fatores que a afetam são inúmeros. Na atualidade, degradação e destruição de hábitat são a mais frequente causa de extinção ou de sua ameaça, em virtude da rápida ocupação humana do planeta e eliminação dos hábitats naturais de um enorme e crescente número de espécies; casos específicos no passado geológico são difíceis de identificar, mas basta lembrar, como exemplo, as alterações acentuadas do nível do mar e mudanças climáticas intensas, tantas vezes repetidas na história da Terra, para imaginarem-se as alterações ambientais profundas havidas ao longo do tempo e o impacto por elas causado sobre os seres vivos. O desaparecimento de espécies devido a extinções anteriores, no caso dos fósseis ou de espécies subfósseis, também é difícil de exemplificar, mas cita-se na literatura a extinção da águia-gigante *Harpagornis moorei* da Nova Zelândia atribuída à extinção de suas presas preferenciais, as moas, provocada pelos maoris ao ocuparem o arquipélago; aventa-se também a hipótese de que o desaparecimento dos gatos-dentes-de-sabre americanos se deveu à sua especialização para a captura de grandes mamíferos, drasticamente reduzidos no Pleistoceno (Diamond, 1994).

Em tempos recentes, são numerosos os exemplos de extermínio por invasão de hábitats por espécies agressivas ou competidoras. Ratos e pequenos carnívoros levados pelos polinésios na ocupação gradativa das ilhas do Pacífico, ao longo de séculos, significaram enorme devastação nas espécies endêmicas por eles encontradas, que pode ter significado a eliminação de um quinto de todas as aves do mundo (Steadman, 1995). Em escala temporal muito maior, pode-se especular com as extinções na fauna sul-americana depois do Grande Intercâmbio Faunístico Americano. No decorrer de aproximadamente oito milhões de anos após os primeiros casos de invasão da América do Sul pela fauna norte-americana, numerosas espécies autóctenes desapareceram, inclusive duas ordens

de mamíferos (Notoungulata e Litopterna); outra (Xenarthra) foi severamente reduzida, no que pesem alguns gêneros da última terem tido êxito pelo menos temporário na colonização do continente norte-americano, incluindo gliptodontes, diversos gêneros de preguiças terrícolas e tamanduás, acompanhando o sucesso também passageiro de uma ave terrícola gigante de origem sul-americana, o forusracídeo *Titanus*. Interessante é recordar que, naquele espaço de tempo, desapareceu também o último representante dos marsupiais carnívoros sul-americanos de maior porte (Família Borhyaenidae), o notável marsupial-dentes-de-sabre *Thylacosmylus atrox*, além de muitas outras espécies autóctenes. Mais especulativos são os exemplos de extinção por introdução de elementos patogênicos. Em tempos recentes eles não são incomuns, tal como a extinção de espécies de aves do Havaí devida à malária avícola levada ao arquipélago por ação humana. Algumas teorias, não comprovadas e de validade duvidosa, têm atribuído a rápida extinção da megafauna americana à introdução de agentes patogênicos. Contudo, no que pese a falta de dados concretos no registro fóssil, o papel das doenças sem dúvida deve ter sido significativo no processo de extinção ao longo do tempo.

A perda de espécies devido a caça e matanças deliberadas implica necessariamente em atividade humana e há abundância de exemplos. Em tempos relativamente recentes, basta citar dois casos contundentes, o extermínio do tigre-da-tasmânia e do pombo-viajante. O tigre-da-tasmânia (*Thylacinus cynocephalus*), animal de porte relativamente grande e único representante no Holoceno de uma família de marsupiais carnívoros da fauna australiana conhecida desde o Mioceno, foi levado à extinção no início do século 20 por matança deliberada, inclusive com pagamento de prêmio pelos animais abatidos; quando sua situação crítica foi finalmente reconhecida, já era tarde demais para protegê-lo. O pombo-viajante (*Ectopistes migratorius*), possivelmente a ave mais abundante que já existiu, foi morto aos milhões no século 19 e levado à extinção em 1914, quando morreu o último exemplar da espécie. Quanto à fauna pleistocênica, discute-se repetidamente se o homem foi o principal culpado pela extinção da megafauna, particularmente nas Américas, na Austrália e em Madagascar. A discussão, que tem atravessado décadas, não chegou ainda a conclusões definitivas, mas há pelo menos alguns casos comprovados de extinção da fauna fóssil ou subfóssil, por ação

antrópica, nas ilhas do Mediterrâneo e na Nova Zelândia (Martin, 1994). Presume-se ainda que o homem foi responsável pela extinção do réptil *Mekosuchus inexpectatus*, endêmico da Nova Caledônia, último representante dos crocodilos terrestres que tiveram papel importante nas faunas do Cretáceo e do Cenozóico (Ross *et al.*, 1989). Além disto, matanças de grande número de animais hoje extintos ocorreram na Eurásia e América do Norte, e inequívocos casos existem de associação do homem com a fauna extinta na América do Sul, mas sem que se tenha comprovado ter sido humana a causa principal da extinção.

Os eventos catastróficos indicados como capazes de eliminar espécies serão analisados com maior minúcia mais adiante, mas neste ponto é lembrado o enorme poder de destruição das grandes erupções vulcânicas e das mudanças climáticas, ao provocarem alterações mortíferas no ambiente. Embora não estejam registrados casos específicos de extinção, basta lembrar que a grande explosão do Krakatau, a maior dos tempos mais recentes, destruiu completamente a fauna e a flora da ilha; quaisquer espécies endêmicas porventura nela existentes foram obviamente eliminadas. Lembra-se também a fantástica explosão do supervulcão Toba, em Sumatra, ocorrida há ~75.000 anos, a maior erupção havida no Pleistoceno, considerada cerca de 45/65 vezes maior do que a do Krakatau em termos de material expelido e que, aparentemente, quase exterminou a humanidade (Vasquez & Reid, 2004). Um dos mais notáveis achados de fósseis foi um inteiro rebanho com muitas dezenas de exemplares do rinoceronte *Teleoceras major*, sufocados por uma erupção vulcânica no atual Nebraska, EUA.

Quaisquer que sejam as causas de extinção das espécies há que se considerar três modalidades básicas de ocorrência:

- Pseudo-extinção, ou extinção filética, que ocorre com a alteração gradual do genoma, fazendo com que ao longo do tempo as espécies lentamente se transformem em outras, de acordo com o conceito evolutivo de Darwin. Não há propriamente extinção, embora assim pareça devido à imperfeição do registro fóssil (Figura 1).
- Extinção de fundo, ou seja, as extinções “normais” que acontecem dia a dia no decorrer

do tempo, como consequência natural do relacionamento entre as espécies e delas com o meio ambiente. A qualquer momento, no presente e no passado, sempre houve espécies desaparecendo ou surgindo, como bem pode ser exemplificado pela evolução dos cavalos miocênicos da América do Norte (Figura 1).

- Extinções em massa, caracterizada pela eliminação de um grande número de espécies, ou de grupos taxonômicos de maior hierarquia, em espaço de tempo geológico relativamente curto e abrangendo grandes áreas geográficas ou mesmo todo o globo.

Extinções ocorreram durante todo tempo geológico, mas é necessário levar em conta que devido às imperfeições do registro fóssil somente se fossilizou uma parcela ínfima das espécies que existiram e que, das que deste modo se preservaram, muitas nunca foram ou serão descobertas. Em razão

deste fato, jamais se terá certeza de quando uma espécie ou um grupo taxonômico qualquer realmente se extinguiu. Existem numerosos casos em que uma espécie ou grupos de espécies considerados extintos foram redescobertos após longa ausência no registro fóssil, ocorrências inesperadas às quais tem sido aplicada a denominação de “efeito Lázaro”. Um bom exemplo são os anfíbios “labirintodontes” temnospôndilos que, até 1980, eram considerados como extintos no Triássico e dos quais algumas poucas formas foram redescobertas mais tarde no Jurássico Médio da China, Jurássico Superior da Mongólia e Cretáceo Inferior da Austrália (Benton, 2005). Um exemplo muito mais recente se refere ao mamute-lanoso (*Mammuthus primigenius*), que se supunha extinto no final do Pleistoceno, encontrado posteriormente no Holoceno da Ilha Wrangel, ao norte da Sibéria, e nas ilhas Aleutas, no Alasca. Em alguns casos, grupos taxonômicos, considerados extintos há longuíssimo tempo, sobreviveram até hoje, justificando a denominação de “fósseis

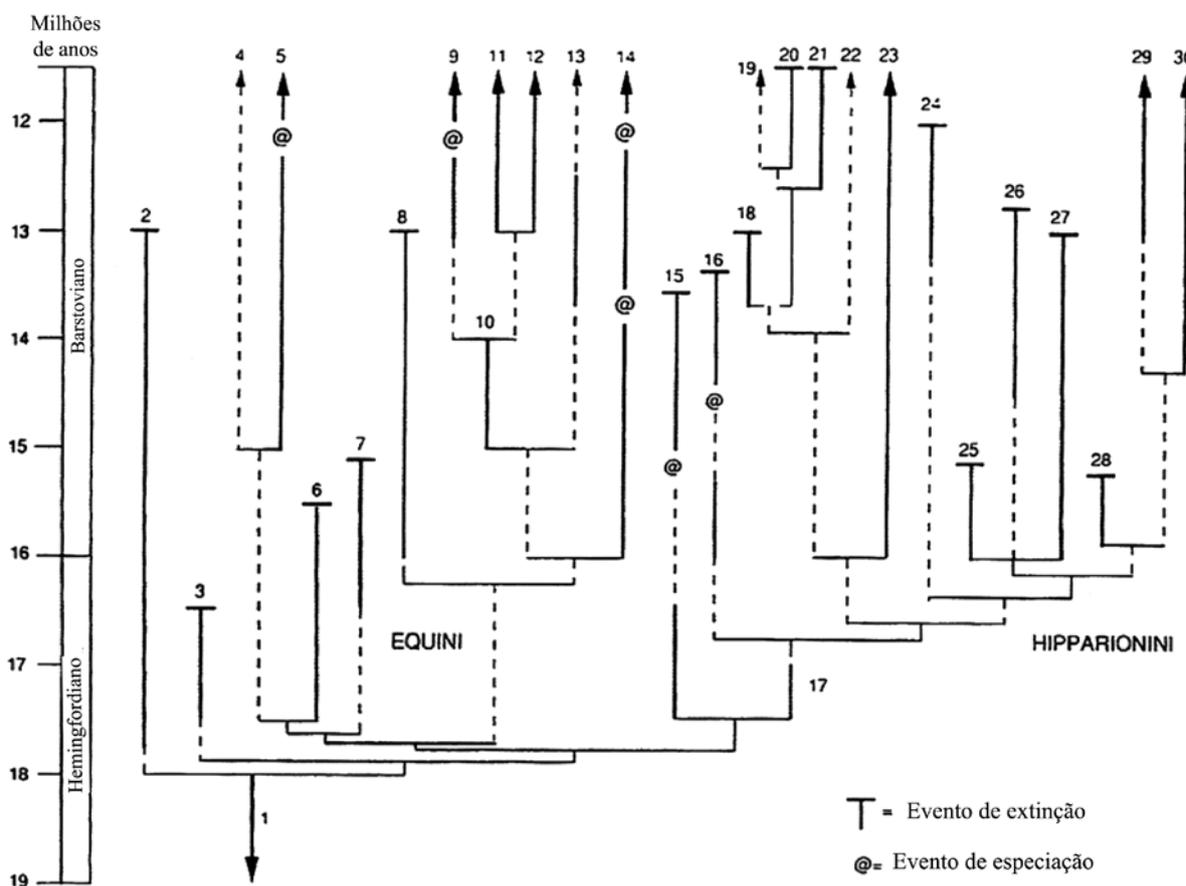


Figura 1 Evolução dos cavalos no Mioceno Médio da América do Norte. De MacFadden (1992) indicando diversos casos de pseudo-extinção (tracejado) e de extinção de fundo (segundo Carroll, 1987).

vivos”, um caso particular do “efeito Lázaro”. Bons exemplos são o celacanto *Latimeria*, pertencente a um grupo taxonômico de peixes crossopterígio supostamente extinto no Cretáceo, descoberto vivo há algumas décadas no Índico; e o esfenodontídeo “tuatara” (gen. *Sphenodon*), muito semelhante a formas conhecidas desde o Triássico, hoje sobrevivente com duas espécies em algumas ilhas costeiras da Nova Zelândia depois de exterminado por ação humana nas ilhas principais.

No exame do fenômeno do desaparecimento das espécies, as extinções em massa merecem um tratamento mais minucioso, pela sua excepcional importância na história da vida. Nas demais categorias de extinção, antes mencionadas, prepondera a seleção natural, ou seja, a sobrevivência final dos mais aptos segundo o conceito darwiniano, ainda que possam ocorrer episodicamente extinções devidas ao azar, como aquelas decorrentes de caça ou eventos catastróficos localizados; o desaparecimento do pombo-viajante ou do tigre-da-tasmânia, antes citados, não decorreu de essas espécies serem inadaptadas ao seu ambiente, mas apenas à incúria humana. No entanto, as extinções em massa são caracteristicamente causadas por processos catastróficos surgidos aleatoriamente e, como tal, elas fogem ao conceito darwiniano de seleção natural. Nesses casos, outros fatores além da seleção natural são preponderantes e as extinções acontecem ao sabor do acaso; é uma questão da espécie, em circunstâncias ambientais extremas e excepcionais, ter ou não ter sorte. Mas, em virtude da abrangência quanto ao enorme número de espécies simultaneamente eliminadas, as extinções em massa mudam os rumos da evolução e provocam alterações radicais na biota mundial. Se não houvesse ocorrido uma extinção dessa natureza no final do Cretáceo, o mundo atual seria completamente diferente e nem mesmo a humanidade existiria. Portanto, é necessário lembrar que as extinções em massa são, ao mesmo tempo, altamente destrutivas, mas também inovadoras; elas são agentes de suma importância na renovação evolutiva.

Pode-se, pois, sintetizar a análise do fenômeno da extinção reconhecendo que, em tempos normais, via de regra, extinguem-se as espécies menos aptas, por efeito da seleção natural. Em tempos anormais, quando acontecem grandes eventos de natureza catastrófica, as extinções ocorrem predominantemente ao acaso, abrangendo grande parte da biota ou, pelo

menos, alguns grupos taxonômicos numericamente significativos. Nessas condições, a sobrevivência depende fundamentalmente de a espécie estar no lugar certo, no tempo certo. A existência de extinções abrangendo um grande número de espécies se repetiu, com maior ou menor intensidade, ao longo da história da vida. Importa, portanto, conceituar o que deve ser considerado como uma extinção em massa e, quanto a isto, as opiniões são variáveis. Jack J. Sepkoski sugeriu que o critério para caracterizar uma extinção em massa deveria ser a eliminação de 15% das famílias, em até 15 milhões de anos, e com abrangência planetária (McGhee Jr., 1996). É claro que tal critério é arbitrário, porém dá uma idéia do que deva ser considerado uma extinção em massa; mas, não pode ser esquecido que, em escalas menores, episódios localizados de extinção catastrófica também ocorreram, fugindo igualmente aos limites da seleção natural.

Extinções maciças foram reconhecidas há longo tempo. Georges Cuvier, o grande paleontólogo que viveu no final do século 18 e início do 19, já as imaginava ao estudar as sucessões faunísticas na Bacia de Paris. Em 1860, apenas um ano após a publicação da obra magistral de Darwin, *On the Origin of Species*, John Phillips, professor de Geologia em Oxford, reconheceu dois grandes períodos de crise profunda na história da vida, um no final do Paleozóico e outro ao término do Mesozóico, além de dois outros menores (Figura 2). Ele propôs que essas duas crises deveriam sinalizar o final das duas eras e dividir o registro estratigráfico em três grandes blocos.

Cerca de 120 anos depois, Jack J. Sepkoski realizou um monumental trabalho de levantamento das famílias de animais marinhos existentes nos últimos 550 milhões de anos, do que resultou a curva da diversidade da vida marinha ao longo desse enorme espaço de tempo (Figura 3). Hoje amplamente divulgada, e no que pesem críticas diversas, essa curva permitiu identificar cinco grandes episódios de extinção em massa da vida no mar: final do Ordoviciano, Devoniano Superior, e final do Permiano, do Triássico e do Cretáceo. Essas extinções afetaram também, em graus distintos, as floras e faunas terrestres então existentes, embora nem sempre nas mesmas condições. Diversos outros episódios de extinção, menos intensos, também são identificados no levantamento de Sepkoski. É pertinente assinalar que após cada período de extinção em massa decorreu um intervalo de cerca

de 10 milhões de anos para que a diversidade biológica voltasse aos níveis anteriores (Kirchner & Well, 2000), obviamente com outra composição faunística e florística. Importa também observar que, apesar dos altos e baixos, a diversidade biológica evidenciou tendência para aumentar; quando os primeiros hominíneos surgiram no Plioceno, ela provavelmente se encontrava em seu mais elevado grau. A curva de Sepkoski, voltada para a fauna marinha, não indica um caso especial de extinção em massa, em escala mais reduzida, que afetou severamente a megafauna terrestre mundial no decorrer do Pleistoceno, especialmente importante devido à sua contemporaneidade com o homem.

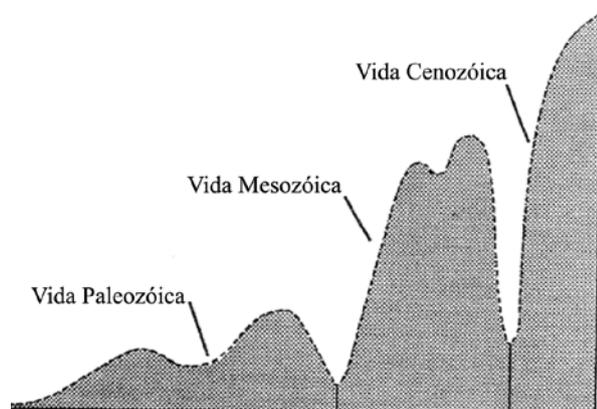


Figura 2 A proposta de John Phillips, em 1860, sobre a diversidade de vida ao longo do tempo geológico, dividindo-o em três eras (McGhee Jr., 1996).

3 As Causas das Extinções

Reconhecida a existência de episódios de extinção em massa, esse fato nos leva a um terreno pouco firme – a sua causa. A literatura é conflitante e indica grande variedade de possíveis causas, cuja preponderância varia de autor para autor e para cada episódio de extinção. Algumas dessas causas apresentam graus variáveis de confirmação e freqüentemente são inter-relacionadas ou combinadas. As causas principais aventadas são:

- Erupções vulcânicas de grande intensidade e duração, com derrames de lavas atingindo volumes de milhares de quilômetros cúbicos e colossais quantidades de gases, particularmente dióxido de carbono (CO_2) e dióxido de enxofre (SO_2)

- Impactos de grandes meteoritos ou cometas
- Variações acentuadas de nível do mar
- Emissões maciças de dióxido de carbono (CO_2) ou de metano (CH_4), estas possivelmente devidas à sua liberação do gás existente em abundantes depósitos de clatrato de metano, situados no fundo dos mares
- Anoxia dos mares
- Variações intensas de temperatura, devido a efeito estufa ou a glaciações em ampla escala
- Variações acentuadas na composição da atmosfera (proporções de oxigênio, dióxido de carbono e óxidos de enxofre)

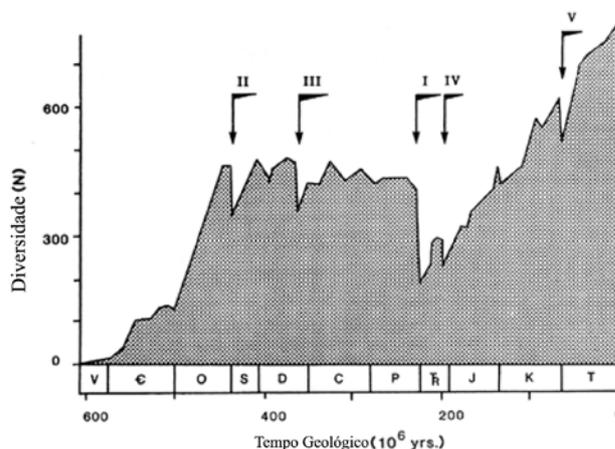


Figura 3 Número de famílias de animais marinhos durante o tempo geológico, segundo Sepkoski. As setas indicam aproximadamente o tempo que foi necessário para que a abundância de famílias se recuperasse após cada grande extinção em massa. (McGhee Jr., 1996).

Interessante é assinalar que várias dessas possíveis causas estão associadas direta ou indiretamente a atividades do manto terrestre (Landis *et al.*, 1996; Ward, 2006). Além disto, deve-se também considerar que a ocorrência de algumas dessas possíveis causas de fato podem com segurança ser identificadas simultaneamente com episódios de extinção em massa. Há, por exemplo, uma correlação inegável entre as cinco grandes

extinções e a redução do nível dos mares, como mostrado na Figura 4, bem como entre regressões marinhas e anoxia (Hallan, 1992; MacLeod & Keller, 1996). As reduções de nível do mar também podem ter efeitos severos nos climas dos continentes. Há também uma forte correlação entre episódios de anoxia e regressão do mar, parecendo que na maior parte do Fanerozóico as águas profundas foram em grande parte anóxicas (Hallan, 1992). Colossais derrames de lavas foram identificados na transição Permiano/Triássico (trapps siberianos, no norte da Sibéria) e no final do Cretáceo (trapps do Deccan, na Índia), este último cobrindo 10.000 km², com espessura de até 2,5 km; estes imensos derrames podem ter provocado catástrofes globais, mediante a liberação de imensas quantidades de CO₂ e SO₂, capazes de alterar significativamente a composição da atmosfera, a temperatura do planeta e a química dos mares, gerando um processo cumulativo e auto-sustentado de degradação (Ward, 2006). O impacto de um gigantesco meteorito no final do Cretáceo foi comprovado pela descoberta da cratera de Chicxulub, na província de Yucatan, México, com diâmetro de aproximadamente 195 km (Benton, 2005), evento ao qual muitos autores atribuem a extinção em massa constatada no final do Mesozóico. Desde a

publicação dos trabalhos de Luís e Walter Alvarez, e co-autores, no início dos anos 80, sobre os supostos efeitos apocalípticos globais desse impacto no final do Cretáceo, tem havido uma tendência para atribuir-se a ele a extinção em massa então ocorrida. Contudo, sem negar os possíveis efeitos gravíssimos desse colossal impacto, deve ser lembrado que conhece-se dezenas de crateras de grandes dimensões não associadas a episódios de extinção (Carroll, 1997), tais como a cratera de Manicougan, no Canadá, com cerca de 150 km de diâmetro e datada de 206/214 Ma (Triássico Inferior), não muito inferior em tamanho à de Chicxulub; e, no Brasil, a cratera de Araguainha, com 40 km de diâmetro, datada de 245 Ma, também no Triássico Inferior (Schobbenhaus *et al.*, 2002). Sem dúvida, as conseqüências regionais de enormes impactos como o do Canadá, ou mesmo o do Brasil, devem ter sido imensas, mas como conciliar a existência de tais enormes crateras, sem identificação de quaisquer efeitos globais de extinção, com os supostos efeitos cataclísmicos em âmbito mundial atribuídos ao impacto do final do Cretáceo? É um ponto importante para reflexão.

4 As Extinções ao Longo do Tempo Geológico

Vejamos a seguir alguns aspectos peculiares que têm sido atribuídos aos cinco grandes episódios de extinção.

A extinção no final do Ordoviciano foi a segunda mais intensa já registrada, atingindo essencialmente a biota marinha, então totalmente dominante. Calcula-se que tenham sido eliminadas cerca de 100 famílias de animais marinhos, incluindo trilobitas, graptolitos, braquiópodes, crinóides e corais (Stanley, 1984; Hallan, 1992), correspondendo a algo como 30% das famílias existentes, mais de 50/60% dos gêneros e talvez 80/85% das espécies (Gibbs, 2001). Sua causa principal parece ter sido uma drástica redução do nível do mar devida a intensa glaciação, provocando ampla mudança de climas e de habitats (McGhee Jr., 1996).

A extinção do Devoniano, a idade dos peixes e da grande expansão da vegetação terrestre, foi a terceira mais intensa e tem suas causas muito incertas, atribuídas duvidosamente a impactos sucessivos de grandes meteoritos, glaciação, queda

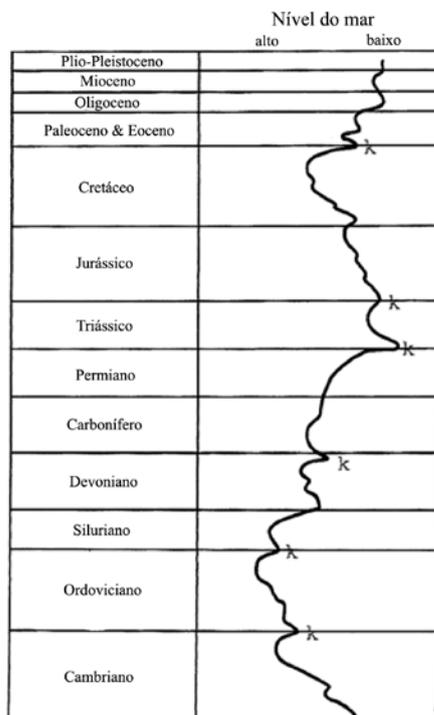


Figura 4 Curva do nível do mar no Fanerozóico, mostrando as cinco grandes extinções em massa e sua correlação com redução do nível do mar (Hallan, 1992).

global de temperatura, redução de CO₂ e anoxia nos mares; o único mecanismo que satisfaz a todos os aspectos ecológicos da extinção devoniana parece ser queda acentuada de temperatura, com anoxia nos mares (McGhee Jr., 1996; Stanley, 1984), mas dúvidas persistem. Diferentemente das demais extinções em massa, não aconteceu no final de um período geológico, ou seja, na transição Devoniano/Carbonífero, mas na fase final do Devoniano (Frasniano e Famenniano), entre 377 e 362 Ma (McGhee Jr., 1996). Há dúvidas se constituiu um ou mais episódios de extinção e claramente não foi um evento instantâneo, durando cerca de dois a três milhões de anos. Atingiu essencialmente a vida marinha, especialmente nas baixas latitude. Das 70 famílias de peixes reconhecidas no Devoniano Superior, apenas 17 sobreviveram no Carbonífero (Benton, 2005). Embora os dados sejam imprecisos, estima-se que foram eliminados 14/38% famílias, 50/57% dos gêneros marinhos e 70/83% das espécies marinhas (Gibbs, 2001; McGhee Jr., 1996), afetando principalmente foraminíferos bentônicos, corais, braquiópodes, estromatoporóides, briozoários, amonóides, trilobitas e conodontes (Hallan, 1992). Cerca de 90% do fitoplâncton preservável foi afetado (McGhee Jr., 1996). Ocorreu ainda grande declínio da vegetação terrestre, com dramática queda de diversidade de esporos fossilizados, embora aparentemente tal redução tenha durado mais do que o período de extinção em massa (McGhee Jr., 1996). Pouco se sabe dos artrópodes terrestres. É interessante lembrar que a extinção devoniana se processou quando os vertebrados estavam conquistando o meio terrestre. O que teria acontecido se nossos ancestrais houvessem sido também eliminados?

A extinção do Permiano foi a maior de todas; afetou pesadamente tanto a vida marinha quanto a terrestre, e evidencia-se como a maior crise biótica que a Terra já presenciou. O evento aparentemente foi geologicamente rápido e parece ter sido causado por extremo vulcanismo, ocorrido na atual Sibéria (trapps siberianos) há ~251 +/- 0,3 Ma, e com duração de ~600.000 anos (Benton, 2005; Kerr, 2000); Erwin (2006) acredita que possa ter durado apenas 200.000 anos. Estima-se que teriam sido ejetados ao longo desse tempo três a quatro milhões de quilômetros cúbicos de lavas (equivalente a um cubo com 140/160 km de aresta), com profundas repercussões na atmosfera e provocando efeito estufa exacerbado e múltiplos efeitos correlatos (Benton, 2005). Ward (2004) atribui a mortandade

de animais terrestres a rápido aumento de dióxido de carbono e de temperatura em função dos derrames de lava, liberação de metano do fundo dos mares, oxidação ampla de substâncias orgânicas e minerais, e conseqüente redução do nível de oxigênio atmosférico, que pode ter chegado a apenas 10/15%; os seres vivos teriam sido literalmente sufocados. Erwin (2006) reviu suas propostas anteriores (Erwin, 1993) e concentrou suas explicações sobre as causas da grande crise nos grandes derrames de lavas na Sibéria, e as conseqüências decorrentes. Ao todo, estima-se que foram exterminadas 50/75% das famílias, 82/83% dos gêneros e 80/96% das espécies então existentes (Gibbs, 2001; McGhee Jr., 1996; Benton *et al.*, 2004; Benton, 2005); outros autores citam 90% das espécies marinhas e 70% das terrestres (Ward *et al.*, 2000). Das 48 famílias de vertebrados terrestre existentes no final do Permiano, sobreviveram apenas 12 (Benton, 2005). Ao todo, desapareceram 50 a 75% das famílias no mar e em terra (Benton, 2005). Foram atingidos na vida marinha principalmente amonóides, foraminíferos, trilobitas, braquiópodes, corais, crinóides e briozoários (Stanley, 1984; Hallan, 1992). A vegetação e o fitoplâncton também sofreram pesadamente, incluindo o desaparecimento total da flora de *Glossopteris*, de ampla distribuição geográfica anterior. Eliminaram-se 50% dos invertebrados marinhos, dentre eles as últimas trilobitas. De 48 famílias de tetrapodes no final do Permiano, 36 desapareceram, incluindo 17 de terápsidas (Benton, 2005). Extinguiram-se todos os répteis basais (exceto os procolofonídeos), quase todos os anfíbios “labirintodontes” (especialmente os “antracossauros”) e a maior parte dos terápsidas, incluindo grande parcela dos dicinodontes. Sobreviveram umas poucas linhagens de “labirintodontes” temnospôndilos, cinodontes, arcossauros basais e lepidossauromorfos, além de alguns dicinodontes, procolofonídeos e terocefalianos; um notável sobrevivente foi o dicinodonte *Lystrosaurus* que, encontrando um mundo com fauna empobrecida e sem inimigos, tornou-se enormemente abundante e espalhou-se pelo mundo (África, Antártica, Índia e Rússia).

Após o evento maciço de extinção, os sobreviventes deram origem a uma fauna muito típica do Triássico, composta por terápsidas avançados - os cinodontes -, grandes dicinodontes, rinocefalianos e, principalmente uma quantidade de formas de um grupo parafilético de arcossauros primitivos, os “tecodontes”, que tomaram o lugar dos terápsidas carnívoros do Permiano. Cerca de

40 novas famílias surgiram no Triássico Inferior (Carroll, 1997). Exceto os cinodontes carnívoros e uns poucos labirintodontes sobreviventes, essa fauna típica desapareceria no decorrer do Triássico Superior (Carniano) ou no seguinte episódio de extinção em massa, no final deste período (Benton, 1986). Na fase final do Triássico, surgiram então os grupos taxonômicos que seriam os principais componentes da fauna no restante do Mesozóico, especialmente os répteis marinhos ictiossauros e plesiossauros, os dinossauros, os crocodilomorfos, os pterossauros, as tartarugas, os anuros e os mamíferos.

A extinção em massa do Triássico, a quarta em intensidade, aparentemente foi gradual e se desenvolveu em estágios (Gibbs, 2001), eliminando todos os “tecodontes”, rinocefálios e dicinodontes. Dos sinápsidas, apenas os mamíferos e alguns cinodontes carnívoros de pequeno porte sobreviveram, estes até o final do Jurássico. A vida marinha também foi fortemente atingida, com extinção de amonóides, moluscos bivalvos e gastrópodes (Stanley, 1984), e constatou-se o fim dos conodontes, cordados primitivos de grande importância estratigráfica; presume-se que foram eliminados 53% dos gêneros e 80% das espécies (Gibbs, 2001). A causa da extinção foi atribuída a vulcanismo e aquecimento global, havendo indícios de aumento de CO₂ (Retallack, 2002).

A mais “glamourosa” das extinções em massa, a do Cretáceo, na verdade foi a menos intensa das cinco, mas notabilizou-se pela extinção dos dinossauros e pelas acirradas e intermináveis polêmicas em torno de suas causas. O fim do Cretáceo caracterizou uma ocasião em que aparentemente tudo deu errado na Terra em espaço de tempo geologicamente curto: impacto de um enorme meteorito, colossal derrame de lavas (trapps do Deccan, na Índia, entre 66 e 65,5 Ma), dramático recuo do mar, com 27% de crescimento da área terrestre (MacLeod & Keller, 1996) seguido de forte transgressão, efeito estufa e consideráveis alterações na atmosfera, com uma redução de oxigênio atmosférico de até 12%, em relação aos elevados níveis até então prevalentes (Hengst *et al.*, 1996). O episódio de extinção parece ter sido rápido, no máximo algumas centenas de milhares de anos (Benton, 2005), mas as opiniões são discordantes; os defensores da extinção pelo impacto consideram-na praticamente instantânea, em termos geológicos. Afetou profundamente parte da vida marinha, com a eliminação de foraminíferos

plantônicos (especialmente nas baixas latitudes), do fitoplâncton calcáreo, de importantes grupos de moluscos (principalmente amonóides e alguns bivalvos gigantes), corais, equinóides, briozoários, esponjas, répteis marinhos (Hallan, 1996). Em terra, ao todo, foram exterminadas 36 famílias de vertebrados (Carroll, 1997), incluindo obviamente os últimos dinossauros. Em pelo menos algumas regiões, há evidências de extinção de grande parte da vegetação, com aumento da presença de esporos de fetos, indicando alteração acentuada do ambiente (Carroll, 1997; Vajda & McLoughlin, 2004), embora a maior parte da vegetação nas latitudes médias e altas pareça ter sido pouco afetada (Archibald, 1996). As evidências sugerem que alguns grupos taxonômicos desapareceram catastróficamente na transição Cretáceo/Cenozóico, mas outros tiveram um longo declínio anterior (Benton, 2005; Archibald, 1986).

A extinção, ao que parece, não foi seletiva e atingiu ao acaso diferentes grupos taxonômicos. Nos poucos locais onde existe um bom registro fóssil da fauna na exata transição K/T (oeste dos EUA, Canadá e China), verificou-se que alguns grupos sobreviveram em grande proporção, outros foram drasticamente reduzidos e uns poucos se extinguíram totalmente (Figura 5). Pouco afetados pela extinção foram as diatomáceas, os foraminíferos bentônicos, os braquiópodes, os gastrópodes, os artrópodes, grande parte dos peixes, anfíbios, tartarugas, lagartos e plantas terrestres, sendo especialmente curioso o elevado percentual de sobrevivência dos anfíbios, caracteristicamente muito sensíveis a alterações ambientais. Extinguiram-se 47% dos gêneros marinhos e 76% das espécies marinhas (Gibbs, 2001). Ao todo, de 210 famílias registradas para o período, 64 se extinguíram, um percentual de 30%. (Benton, 2005). No entanto, alguns grupos já haviam desaparecido, como os ictiossauros e plesiossauros, e outros encontravam em clara decadência milhões de anos antes do final do período, pelo menos quanto à diversidade, tais como dinossauros, pterossauros e amonóides (Figura 6); para estes grupos, os eventos cataclísmicos havidos ao término da era foram o golpe final. A causa principal da extinção do fim do Cretáceo tem sido atribuída por uma grande parcela dos cientistas ao impacto do meteorito, mas existem sérias contestações por parte de outros, havendo evidências de que a extinção de diversos grupos não está relacionada com o impacto (Keller, 1996; Landis *et al.*, 1996; Stanley, 1984; Courtillot,

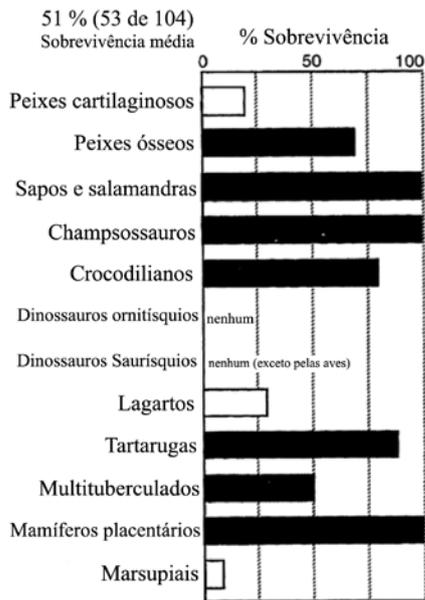


Figura 5 Nível de sobrevivência de diversos grupos de vertebrados na transição K/T, no oeste dos EUA (Archibald, 1996).

1999); há modelos gradualistas e catastrofistas para explicação da extinção no final do Cretáceo, sendo difícil saber-se se as diferentes hipóteses podem ser combinadas (Benton, 2005; Ward, 2004); contudo, permanecem poucas dúvidas sobre a ocorrência de um grande impacto no final do período, ainda que a real intensidade de seus efeitos não esteja ainda de fato bem definida. Keller (1996) julga que o impacto ocorreu antes do horizonte da extinção principal e que a cratera de Chicxulub não tem dimensões compatíveis com uma extinção global (Digregorio, 2005).

A grande significação biológica da extinção do final do Cretáceo, com a eliminação dos grandes répteis, foi ter aberto a oportunidade para a irradiação adaptativa dos mamíferos e das aves modernas.

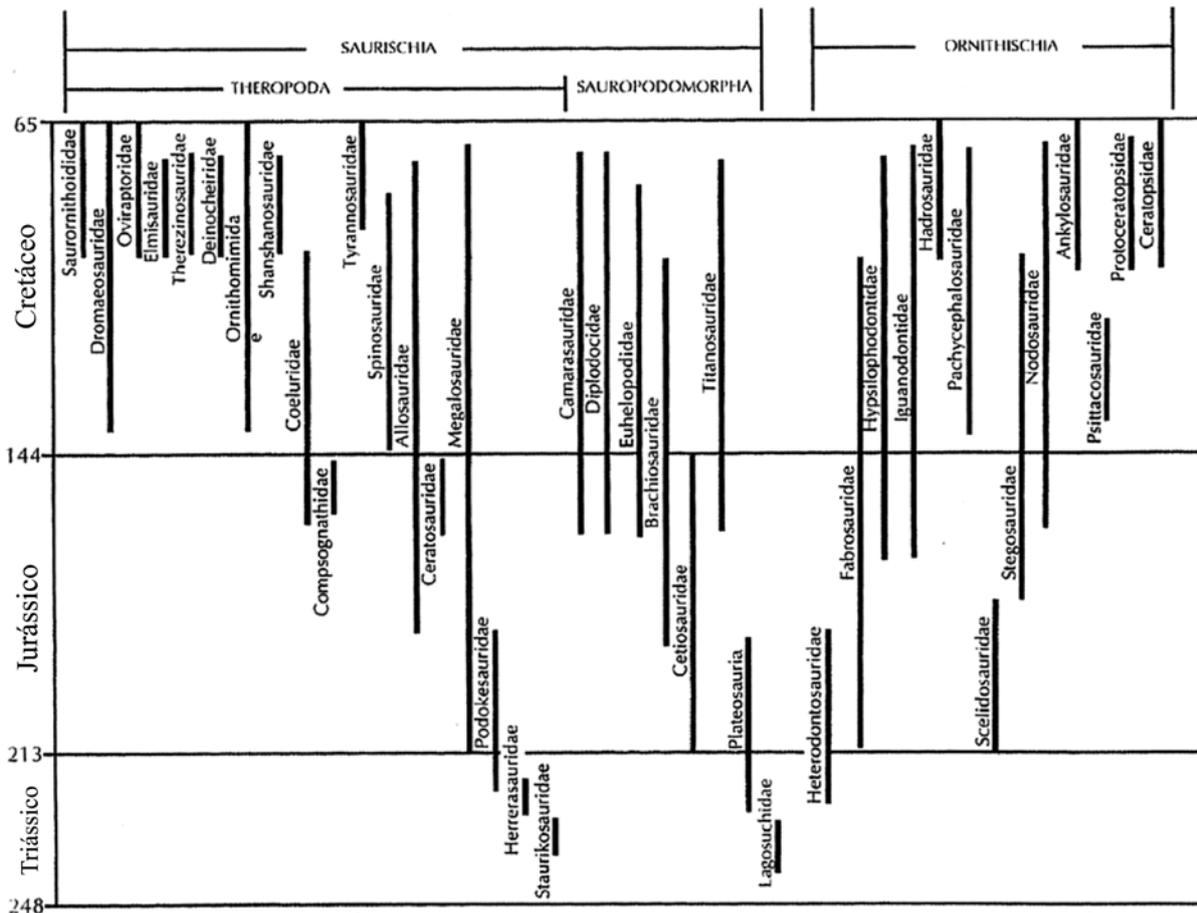


Figura 6 Situação estratigráfica das diferentes famílias de dinossauros no final do Cretáceo, evidenciando que eles já estavam em decadência antes do limite K/T (Carroll, 1997).

5 Conclusões

Ao findar este breve relato sobre a extinção no registro fóssil, cabe alertar para o fato gravíssimo de que estamos efetivamente vivendo nos tempos presentes a sexta grande extinção em massa, a única cuja causa é bem definida: o *Homo sapiens*. Com sua maciça, ampla e extraordinariamente rápida ocupação de todos os espaços físicos do planeta, a generalizada alteração dos ambientes, a intensa eliminação de ecossistemas naturais, a devastadora pressão sobre as demais formas de vida e o uso desregrado dos recursos naturais, a humanidade está empobrecendo a biosfera de forma somente comparável à das grandes extinções do passado; Wilson (1994) calculou que, somente nas florestas tropicais, estejam sendo destruídas 27.000 espécies a cada ano, três a cada hora! Esta é uma realidade dramática, por poucos apercebida e geralmente não sentida no nosso dia a dia, mas que não podemos deixar de reconhecer e de lamentar, uma vez que somos nós os vilões desse drama. Na verdade, não seria exagero afirmar que estamos presenciando um evento importantíssimo na história do planeta: o encerramento do Cenozóico e o limiar da Era Antropozóica.

6 Referências

Archibald, J.D. 1986. Testing extinction theories at the Cretaceous-Tertiary boundary using vertebrate fossil record. *In: MACLEOD, N. & KELLER, G. (eds.) Cretaceous-Tertiary mass extinctions – biotic and environmental changes*. N. York-London, W.W. Norton & Comp, p. 373-397.

Benton, M.J. 1988. Late Triassic tetrapod extinction events. *In: PADIAN, K. (ed.) The beginning of the Age of Dinosaurs*. Cambridge, Cambridge University Press, p. 303-320.

Benton, M.J. 2005. *Vertebrate Paleontology*. 3 ed. Oxford, Blackwell Publication, 455 p.

Benton, M.J.; Tverdokhlebov, V.P. & Surkov, M.V. 2004. Ecosystem remodeling among vertebrates at the Permian-Triassic boundary in Russia. *Nature*, 4-11-2004: 97-100.

Carroll, R.L. 1997. *Patterns and processes of vertebrate evolution*. Cambridge, Cambridge University Press, 448 p.

Courtillot, V. 1999. *Evolutionary catastrophes:*

the science of mass extinctions. Cambridge, Cambridge University Press, 173 p.

Diamond, J.M. 1994. Historic extinctions: a Roseta Stone for understanding prehistoric extinctions. *In: MARTIN, P.S. & KLEIN, R.G. (eds.) Quaternary extinctions – a prehistoric revolution*. Tucson, The University of Arizona Press, p. 824-862.

Digregorio, B.E. 2005. Doubts on dinosaurs. *Scientific American*, 292(5): 14.

Erwin, D.H. 1993. *The great Paleozoic crisis*. N. York, Columbia University Press, 327 p.

Erwin, D.H. 2006. *Extinction: how life on Earth nearly ended 250 million years ago*. Princeton University Press, 306 p.

Gibbs, W.W. 2001. On the termination of species. *Scientific American*, 285(5): 28-37.

Hallan, A. 1992. *Phanerozoic sea-level changes*. New York, Columbia University Press, 266 p.

Hengst, R.A.; Rigby, J.K.; Landis, G.P. & Sloan, R.L. 1996. Biological consequences of Mesozoic atmospheres: respiratory adaptations and functional range of *Apatosaurus*. *In: MACLEOD, N. & KELLER, G. (eds.) Cretaceous-Tertiary mass extinctions – biotic and environments changes*. New York-London, WWW Norton & Company, p. 327-347.

Keller, G. & Stinnesbeck, W. 1996. Sea level changes, clastic deposits, and megatsunamis across Cretaceous-Tertiary boundary. *In: MACLEOD, N. & KELLER, G. (eds.) Cretaceous – Tertiary mass extinctions – biotic and environmental changes*. New York-London, WWW Norton & Company, p. 451-469.

Kerr, R.A. 2000. Biggest extinction hit land and sea. *Science*, 289(5485):1666-1667.

Kirchner, J.W. & Well, A. 2000. Delayed biological recovery from extinctions throughout the fossil record. *Nature*, 9-03-2000: 177-180.

Landis, G.P., Rigby, J.K.; Sloan, R.E; Hengst, R. & Snee, L.W. 1996. Pele's Hypothesis: Ancient atmospheres and geochemical controls on evolution, survival and extinction. *In: MACLEOD, N. & KELLER, G. (eds.) Cretaceous – Tertiary mass extinctions – biotic and environments changes*. N. York-London, WWW Norton & Company, p. 519-556.

MacLeod, N. & Keller, G. 1996. *Cretaceous – Tertiary mass extinctions – biotic and environmental changes*. New York - London, W.W. Norton & Company, 575 p.

Martin, P.S. 1994. Prehistoric overkill: a global

- model. In: MARTIN, P.S. & KLEIN, R.G. (eds.). *Quaternary extinctions – a prehistoric revolution*. Tucson, The University of Arizona Press, p. 354-403.
- McGhee Jr., G.R. 1996. *The Late Devonian mass extinction – the Frasnian/Famennian crisis*. New York, Columbia University Press, 303 p.
- Retallack, G.J. 2002. Triassic-Jurassic atmospheric CO₂ spike. *Nature*, 24-01-2002:387-388.
- Ross, C.A.; Garnett, S. & Pyrzakowsky, T. 1989. *Crocodiles and alligators*. Sydney, Welton Owen Pty Ltd., 240 p.
- Schobbenhaus, C.; Campos, D.A.; Queiroz, E.T.; Winge, M. & Berbet-Born, M.L.C. 2002. *Sítios geológicos e paleontológicos do Brasil*. MME/DNPM/CPRM/SIGEP, Brasília, 540 p.
- Stanley, S.M. 1984. Mass extinctions in the ocean. *Scientific American*, 250(6): 46-54.
- Steadmam, D.W. 1995. Prehistoric extinctions of Pacific island birds: biodiversity meets zooarcheology. *Science*, 267: 1123-1131.
- Vajda, V. & McLoughlin. 2004. Fungal proliferation at the Cretaceous-Tertiary boundary. *Science*, 303(5663):1489.
- Vasquez, J.A. & Reid, M.R. 2004. Probing the accumulation history of voluminous Toba magma. *Science*, 13-08-2004.
- Ward, P.D. 2004. *Gorgon – Paleontology, obsession and the greatest catastrophe in Earth's history*. Viking, 257 p.
- Ward, P.D. 2006. Impact from the deep. *Scientific American*, 295(4):42-49.
- Ward, P.D.; Montgomery, D.R. & Smith, R. 2000. Altered river morphology in South Africa related to the Permian-Triassic extinction. *Science*, 289(5485):1740-1743.
- Wilson, E.O. 1994. *The diversity of life*. London, Penguin Books, 406 p.