

EXTINÇÕES EM MASSA E A CRISE ATUAL DA BIODIVERSIDADE: LIÇÕES DO TEMPO PROFUNDO

Marcos Machado

ULBRA; marcospaleobiologia@yahoo.com.br

Cristina Vargas Cademartori

Unilasalle; titina@via-rs.net

Rodrigo Carrilho Barros

CNPq - UFRGS; rodrigocarrilho@pop.com.br

RESUMO

Vive-se atualmente uma crise ambiental sem precedentes, principalmente no que tange à diversidade biológica. Estimativas apontam taxas extintionais entre 100 a 1.000 vezes superiores às taxas de referência. A gravidade do quadro demanda compreensão profunda dos fatores causais do colapso recente. Assim, abordar historicamente o problema, considerando os megaeventos extintionais do passado, permite reconhecer analogias relativas aos padrões e processos existentes. Cada vez mais, o componente histórico-evolutivo afigura-se crucial no processo de gestão da biodiversidade e prioritário às ações conservacionistas.

Palavras-chave

história da biodiversidade, extinção em massa, crise atual da biodiversidade, conservação da biodiversidade, impacto antrópico.

ABSTRACT

**Mass extinctions and today's biodiversity crisis:
lessons from deep time**

Diálogo

Canoas

n. 9

p. 37 - 68

jul-dez 2006



There seems to be nowadays an unprecedented environmental crisis, specially, in relation to biologic diversity. Estimates reveal extinction rates between 100 and 1000 times higher than the reference rates. The gravity of the situation demands thorough understanding of the factors that caused the current collapse. Hence, the importance of historically approaching the problem, taking in consideration the extinction mega events of the past, in order to recognize those analogies related to existing patterns and processes. More and more, the evolutionary historical component presents itself as crucial in the process of biodiversity management and paramount for preservation-oriented actions.

Keywords

history of the biodiversity, mass extinction, today's biodiversity crisis, maintaining biodiversity, human impacts.

PRIMEIRAS PALAVRAS

Nas últimas décadas, o tema extinções tem adquirido relevância crescente, haja vista o número cada vez maior de artigos científicos dedicados à questão. Apenas para ilustrar: entre 1980-84, somente dez artigos foram publicados em periódicos internacionais, já no período 2000-04 somam 338 as publicações relacionadas ao assunto (TWITCHETT, 2006). Esse crescimento extremamente significativo pode ser percebido também pelo espaço concedido pela grande mídia, assim como pelos acordos de cooperação e diretrizes estabelecidas por diversos governos e organizações não-governamentais como, por exemplo, a 8ª Conferência das Partes da Convenção sobre Diversidade Biológica realizada em Curitiba, em março de 2006, que contou com a participação de 187 países mais a comunidade Européia. Evidentemente, esse panorama expressa a urgente gravidade com que o tema da perda de biodiversidade deve ser tratado. No entanto, a fim de que o problema das extinções atuais possa ser mais profundamente entendido, é preci-



so colocá-lo em perspectiva. Em outras palavras, é necessário voltar nossos olhos para o papel desempenhado pelas catástrofes ao longo da história geológica da biodiversidade em nosso planeta.

As extinções são comuns na história da vida na Terra. O registro fóssil é testemunha disso. Estima-se que mais de 99,9% de todas as espécies que já existiram ao longo dos últimos 3,85 bilhões de anos estão extintas (RAUP, 1991). Assim, depreende-se que qualquer espécie, mais cedo ou mais tarde, desaparece, seja em decorrência de uma menor aptidão ecológica, seja em função de alguma catástrofe. Portanto, qualquer debate acerca da extinção futura de uma espécie deve buscar uma resposta para a pergunta “quando”. Conseqüentemente, as extinções não podem mais ser compreendidas como eram até poucas décadas atrás: o epílogo da evolução. Hoje, os eventos extintionais constituem parte fundamental do processo evolutivo, uma vez que não é possível recontar a história da vida em nosso planeta, com seus episódios de substituição faunística e florística, sem considerar os diversos eventos contingentes. As extinções sempre estiveram associadas ao declínio evolutivo, sendo-lhe atribuído um caráter eminentemente destrutivo. Todavia, ocorre que as extinções parecem ter tido papel decisivo em diversos câmbios de biodiversidade, uma vez que, ao eliminar os táxons protagonistas, disponibilizaram inúmeras zonas adaptativas e propiciaram a irradiação de grupos até então obliterados. Apesar disso, há autores que não atribuem papel decisivo às extinções em massa, afirmando que são apenas o resultado do acúmulo de extinções de fundo ou pouco mais do que artefatos estatísticos (SOLÉ *et al.*, 1997). Apesar da importância e da complexidade desse debate, como foi citado anteriormente, o tema não recebeu a atenção devida até pouco tempo. Somente a partir da década de 1970, as extinções assumiram a importância merecida dentro da história da vida, provocando até mesmo uma efervescente discussão no cerne da própria Teoria Evolutiva, ao propor que fatores não-determinísticos pudessem ser os principais responsáveis por padrões macroevolutivos de substituição da biodiversidade.



UM DEBATE SEM FIM

A discussão acerca das extinções revela uma história de graves contendas desde o seu princípio, gerando diferentes versões cada vez mais complexas e sofisticadas, e envolvendo distintos contextos históricos e epistemológicos. A compreensão adequada da origem da polêmica remete, necessariamente, ao fim do século XVIII, quando em 1779, o naturalista francês George Buffon (1707-1788) e, em 1785, o geólogo escocês James Hutton (1726-1797) sugeriram uma Terra muito mais antiga do que propunham os textos bíblicos (MAYR, 1998; TAYLOR, 2004). Para este, Deus havia criado o planeta como uma grande máquina, no sentido newtoniano. E essa máquina era composta por grandes ciclos geológicos que se sucediam, sem início e sem fim. Assim, as camadas estratigráficas, que haviam sido expostas e erodidas ao longo da história da Terra, expunham a existência de outros “Mundos” antes de nós. Entretanto, a máquina geológica de Hutton necessitava de um motor, alimentado por um combustível, o carvão, que queimava incessantemente no interior mais profundo do planeta. Essa concepção de uma origem ígnea para as rochas, intitulada Plutonismo, estabeleceu uma importante controvérsia com a teoria vigente, o Netunismo, proposta pelo geólogo alemão Abraham Gottlob Werner (1750-1817). De acordo com Werner, as rochas, principalmente sedimentares, haviam sido formadas a partir da precipitação de uma grande inundação, a qual havia gerado um oceano global. Nessa disputa contra os Netunistas, Hutton propôs a noção de “tempo profundo” e abriu caminho para a aceitação da ocorrência de mudanças geológicas lentas e graduais no planeta.

Quando, no século XIX, o ilustre geólogo inglês Sir Charles Lyell (1797-1875), influenciado por Hutton, se rebelou contra as idéias prevalentes na Geologia, propondo uma Terra muito mais antiga e sem a ocorrência de grandes catástrofes, enfrentou a resistência poderosa do grande paleontólogo e anatomista francês Georges Cuvier (1769-1832). Cuvier, baseado em suas interpretações do livro bíblico de Gênesis, defendia a teoria de que a história da vida havia sido marcada



por períodos de criação, estase e destruição. Entretanto, para seu opositor, Lyell, não existiam extinções, apenas mudanças nas abundâncias dos táxons. Tinha início, assim, a história do confronto entre o Catastrofismo e o Uniformitarismo.

Ainda durante a metade do século XIX, pouco se sabia a respeito dos padrões históricos de diversidade da vida. Somente em 1860, um ano após a publicação da *Origem das Espécies*, o geólogo britânico John Phillips (1800-1874) formalizou os conhecimentos concernentes à diversidade existente no Fanerozóico, ao dividi-lo em Paleozóico, Mesozóico e Cenozóico. E o mais interessante, utilizou justamente os períodos de baixa diversidade para definir essas Eras (fig. 1). Em outras palavras, os intervalos correspondentes às altas taxas extintionais. Assim, a mais antiga representação histórica da diversidade da vida incluiu alguns dos maiores eventos de extinção em massa, seguidos por rápidas diversificações.

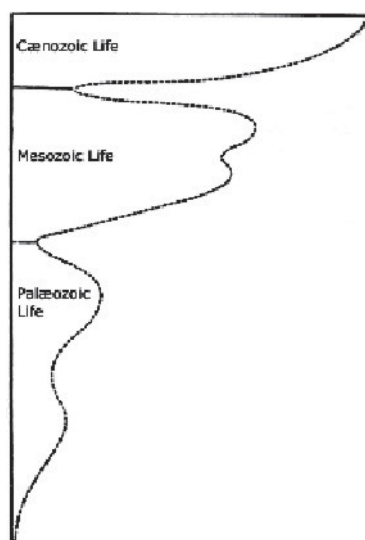


Figura 1. Representação do Fanerozóico, dividido em suas três Eras (Paleozóico, Mesozóico e Cenozóico), a partir dos intervalos de baixa diversidade, proposta por John Phillips em 1860, em sua obra *Life on the Earth: its Origin and Succession* (Fonte: <http://www.strangescience.net/phillips.htm>).



A despeito do admirável trabalho de Phillips, o estudo dos eventos de extinção em massa permaneceu suspenso por mais de um século. A ausência do debate científico em torno desse tema pode ser explicada em função do predomínio do Uniformitarismo nas Ciências Geológicas, desde a publicação da obra *Princípios de Geologia* de Charles Lyell, em 1830 (POPE *et al.*, 1998). Esse livro teve enorme influência sobre o grande naturalista inglês Charles Darwin (1809-1872) que, ao publicar o *Origens*, escreveu no capítulo X:

Quem ler a grande obra de Sir Charles Lyell sobre os princípios da Geologia, à qual os futuros historiadores atribuirão, com justo título, uma revolução nas ciências naturais, sem reconhecer a prodigiosa duração dos períodos decorridos, pode fechar aqui este volume. (DARWIN, 2004, p. 325)

Assim, Darwin contribuiu decisivamente para consolidar a idéia uniformitarista de que as mudanças, tanto geológicas quanto biológicas, eram graduais e que os aparentes eventos de extinção em massa, tais como o limite Cretáceo-Terciário (65,6 m. a.), poderiam ser explicados pelos amplos intervalos sem registro fóssilífero (POPE *et al.*, 1998), apesar do alerta de seu colega e amigo, o famoso zoólogo Thomas Henry Huxley, que lhe afirmou em carta de 23 de novembro de 1859: “Você se sobrecarrega com uma dificuldade desnecessária ao adotar *Natura non facit saltum*¹ de forma tão integral” (FREIRE-MAIA, 1988, p. 347).

Em seu livro, Darwin dedica os capítulos X e XI a três temas controversos dentro de sua Teoria da Evolução por Seleção Natural: o súbito surgimento de grupos inteiros de espécies, extinções e a imperfeição do registro fóssil, afirmando ser este inconfiável, em função de sua incompletude. Com relação ao primeiro problema, escreveu:

Muitos paleontólogos, como Agassiz, Pictet e Sedgwick, por exemplo, salientaram a aparição súbita de grupos inteiros de espécies em determinadas formações como um fato

¹Do Latim: a natureza não dá saltos.



inconciliável com a teoria da transformação. (...) Mas, dispostos como estamos a exagerar continuamente a perfeição dos arquivos geológicos, concluímos, muito falsamente, que alguns gêneros ou algumas famílias não foram encontrados debaixo de uma camada, porque não existiram antes daquele estágio. Podemos confiar plenamente nas provas paleontológicas positivas; mas, como a experiência demonstrou muitas vezes, as provas negativas não apresentam nenhum valor. (DARWIN, 2004, p. 343-344)

Referentemente às extinções, registrou:

A velha teoria da destruição completa de todos os habitantes do globo, após cataclismos periódicos, está hoje geralmente abandonada, mesmo por geólogos da estirpe de E. de Beaumont, Murchinson, Barrande, etc., cujas visões gerais levariam a conclusões dessa natureza. Ao contrário, temos toda razão para crer, pelo estudo das formações terciárias, que as espécies e os grupos de espécies desapareceram gradualmente umas após as outras, primeiro num ponto, depois noutro, finalmente do mundo. (DARWIN, 2004, p. 357)

No início do capítulo dez declarou, reconhecendo a principal dificuldade imposta à sua teoria:

Enumerarei no sexto capítulo as principais contestações que podiam ser justamente exortadas contra as opiniões expostas neste volume. Já discuti a maioria delas. Há uma que constitui uma dificuldade evidente: é a distinção bem nítida das formas específicas e a ausência de inumeráveis elos de transição que as liguem entre si. (DARWIN, 2004, p. 323)

Essa visão não mudou seriamente até os anos 1960, quando Schindewolf (1963) propôs que as extinções catastróficas fossem causadas por picos de influxo de radiação cósmica ou quando, mais recentemente, Raup (1978) afirmou com certa ironia, que se toda extinção fosse gradual e uniforme, então o intervalo de tempo ocorrido no limite Permo-Tiássico (251 m. a.) deveria representar (impossíveis) 85 m. a. Uma compilação realizada por John Sepkoski acerca dos registros fossilíferos de famílias e gêneros de animais marinhos extintos ao longo do Fane-rozóico abriu caminho para a análise de padrões globais de extinções (TAYLOR, 2004). Um marcante artigo escrito por Raup; Sepkoski (1982), versando sobre as



taxas extintionais, reconheceu a existência de cinco grandes episódios de extinção durante os últimos 600 m. a., posteriormente intitulados *The Big Five*. Além disso, Raup; Sepkoski (1984) sugeriram a existência de uma periodicidade extintional ocorrida desde o final do Permiano. A partir de então, houve o despertar de um grande interesse entre os paleontólogos em compreender o destino de determinados grupos durante esses cinco grandes episódios (LARWOOD *apud* TAYLOR, 2004), bem como suas causas. Surgiram, assim, várias explicações alusivas a mecanismos astronômicos. A principal delas ocorreu quando os geólogos estadunidenses Luis Alvarez e Walter Alvarez descobriram altas concentrações de Irídio no limite K-T² (65,5 m.a.), inicialmente em Gubbio, Itália, e mais tarde em diversas outras regiões do planeta (ALVAREZ *et al.*, 1980), coincidentes com a extinção que exterminou os últimos dinossauros e dizimou entre 60% e 75% de toda a vida na Terra (RIDLEY, 2006). Apesar de, inicialmente, ter enfrentado o ceticismo de muitos paleontólogos, a hipótese do impacto como causa para a extinção em massa do K-T recebeu amplo suporte e abriu caminho para investigações sobre mecanismos planetários (vulcanismo global, resfriamento ou aquecimento climático, eustasia, tectonismos) e extraterrestres (meteoros, asteróides, variações orbitais da Terra). Ao atribuir as extinções em massa à destruição dos ambientes, causada por fatores endógenos ou exógenos súbitos e com ação estocástica, a sobrevivência ou a extinção dos táxons precedentes, nesses episódios cataclísmicos, parece depender muito menos de sua aptidão prévia e muito mais do acaso (GOULD; ELDREDGE, 1977). Em outras palavras, estar no lugar certo, no exato momento! Recentemente, contudo, Keller *et al.* (2004) lançaram dúvidas sobre a hipótese de Alvarez. Ao estudar novas amostras, sugeriram que, de fato, o impacto em Chicxulub pode ter precedido o limite K-T em aproximadamente 300 k. a. e que no mínimo dois impactos maiores ocorreram durante o Maastrichtiano

² Cretáceo-Terciário



(70,6 m. a. – 65,5 m. a.). Assim, como pode ser visto, desde seu início e em suas várias versões, a contenda catastrofismo *versus* uniformitarismo continua viva e parece longe do fim.

EXTINÇÕES EM MASSA *VERSUS* EXTINÇÕES DE FUNDO

Conforme relatado, ainda hoje há uma consistente polêmica quanto ao tema extinções, envolvendo até mesmo questões básicas como a distinção entre extinções de fundo e extinções em massa. De acordo com Ridley (2006), a definição exata de uma extinção em massa é arbitrária e diferentes paleontólogos reconhecem distintos números de extinções em massa na história da vida. A controvérsia justifica-se inteiramente, posto que se as extinções em massa diferem, quanto aos seus padrões e processos, das extinções de fundo, então o modelo clássico de evolução determinada pela adaptação a um ambiente que se modifica gradualmente e em pequena escala sofreria um importante abalo, por se mostrar incapaz de explicar satisfatoriamente a impressionante reordenação da história da biodiversidade ocorrida após esses breves períodos catastróficos. Jablonski (1986) afirmou que a teoria evolutiva corrente é formulada quase que exclusivamente em termos de padrões e processos ocorridos durante os longos períodos em que acontecem extinções de fundo, mas se as extinções em massa e de fundo diferem entre si tanto qualitativamente quanto quantitativamente em seus efeitos, então, a alternância de regimes de extinção de fundo e de extinção em massa molda os padrões macroevolutivos da história da vida.

A característica distintiva mais interessante entre extinções de fundo e extinções em massa é que, na primeira, deve-se esperar uma queda em sua taxa, considerando-se que a evolução promove uma adaptação crescente dos organismos aos desafios ambientais existentes. Entretanto, desde que não faz sentido atribuir um papel preditivo à seleção natural frente aos cataclismos, não há por que esperar que as espécies se tornem mais resistentes à extinção. Conforme Van



Valen *apud* Futuyma (2002), dentro da maioria dos grupos taxonômicos, a probabilidade de extinção de um gênero ou família é independente de sua duração prévia. Ele encontrou que o logaritmo do número de táxons que sobrevivem por t anos, plotados contra t , corresponde a uma linha reta com inclinação negativa. Esse padrão implica que, na medida em que algum grupo evolui, não se torna nem mais nem menos resistente a novas mudanças ambientais.

Segundo Jablonski (1986), três fatores afetam a possibilidade de sobrevivência das espécies e dos táxons superiores durante os períodos de extinções de fundo: o modo de desenvolvimento embriológico, a distribuição geográfica e o número de espécies dentro de um grupo considerado. Quanto às extinções em massa, observa-se que o desenvolvimento embriológico precoce³ pode desempenhar papel determinante nos padrões evolutivos dentro da biota pós-extintional. Já a amplitude da distribuição geográfica das espécies afeta muito pouco a sobrevivência dos gêneros. Isto é, a frequência de distribuição geográfica das espécies componentes, contendo vítimas e sobreviventes, não difere significativamente. Entretanto, a recolonização dos ambientes pós-extintionais parece estar mais fortemente associada a táxons cosmopolitas do que a grupos endêmicos. Quanto à riqueza de espécies, comparativamente, extinções de fundo e extinções em massa parecem não se diferenciar. Assim, grupos com baixa ou alta riqueza de espécies apresentam taxas extintionais equivalentes. Mais ainda, o efeito sinérgico da riqueza de espécies e de suas distribuições geográficas é insignificante durante os episódios de extinção em massa. Os modelos de extinção catastrófica demonstram-se discordantes quando comparados com os padrões de contração e expansão dos clados durante os períodos de extinção de fundo que precedem e sucedem ao evento de extinção em massa. Isto é, após o breve período catastrófico ocorre

³ Para esclarecimentos a respeito da influência dos fatores pedogenéticos na história filogenética dos grupos, consultar: GOULD, S. J. **Ontogeny and phylogeny**. Cambridge: Belknap, 1977. 501 p.



um retorno aos níveis normais de extinção e surge uma nova gama de características que poderá favorecer a sobrevivência dos grupos taxonômicos e promover sua irradiação. Jablonski (1986) afirma também que gêneros de briozoários⁴, morfológicamente simples (interpretados como ecologicamente generalistas), apresentaram taxas extintionais relativamente constantes ao longo do Paleozóico, mas que as perdas ocorridas entre gêneros morfológicamente complexos (inferidos como especialistas) estão concentradas nos episódios de extinção em massa. Quando os efeitos das extinções em massa cessam, os táxons complexos restam reduzidos, quando cotejados com táxons simples. Exatamente por isso, os gêneros complexos tendem a ser mais ricos em espécies e mais restritos geograficamente do que os gêneros simples.

Não obstante as evidências fossilíferas anteriores ao Cambriano (542 m. a.- 488,3 m. a.) sejam, em geral, demasiadamente exíguas para caracterizar taxas extintionais significativamente altas, não há razão para duvidar que extinções em massa tenham ocorrido durante o Pré-Cambriano. Quando, no limite Arqueano-Proterozóico (2,5 b. a.), as arqueobactérias metanogênicas (Methanobacteriales, Methanococcales, Methanomicrobiales, Methanopyrales, Methanosarcinales) dominavam completamente o Mundo, sucumbiram a um cataclismo planetário que pode ser considerado a mais dramática de todas as extinções em massa conhecidas, pois as cianobactérias, surgidas há 3 b. a., intoxicaram os mares e os oceanos com oxigênio, gás letal para os metanógenos. Esta hipótese está suportada por evidências geológicas inequívocas. Hoje, podem ser encontrados no sul do Canadá, ao norte do lago Huron, entre 2,45 b. a. e 2,2 b. a., *red beds*, depósitos de arenito vermelho contendo hematita – mineral encontrado exclusivamente em locais cuja atmosfera é rica em oxigênio (KASTING, 2004). Portanto, embora este artigo se

⁴ Grupo de invertebrados majoritariamente marinhos, essencialmente filtradores sésseis e coloniais, cujos primeiros registros datam do Cambriano superior (BARNES, 1984).



dedique a comparar a atual crise da biodiversidade com as extinções fanerozóicas – *The Big Five* – não se pode deixar de ressaltar que já houve uma extinção de proporções planetárias – e o mais impressionante – causada por um agente endógeno e biótico!

AS EXTINÇÕES EM MASSA DO FANEROZÓICO: O FIM DO MUNDO E O RECOMEÇO

Embora, como dito anteriormente, não haja consenso absoluto quanto à caracterização e nem quanto ao número de extinções em massa, são descritos a seguir os cinco grandes episódios extintionais, ocorridos nos últimos 600 m. a., e ilustrados na figura 2.

- Ordoviciano superior (460,9 m. a.- 443,7 m. a.)

Essa extinção apresenta claras evidências associadas a um evento de rápido resfriamento global, principalmente em sua primeira fase, incluindo depósitos glaciais amplamente distribuídos e alterações no registro do isótopo de oxigênio de carbonatos marinhos, decorrente da passagem do Gondwana pelo Pólo Norte (BRENCHLEY *et al.* *apud* TWITCHETT, 2006). Assim sendo, a glaciação global causou depleção do oxigênio em águas profundas e regressão dos mares epicontinentais, afetando tanto organismos abissais quanto de mares rasos (GASTON; SPI-CER, 2004). Os principais grupos afetados foram: cefalópodos, corais, briozoários, crinóides⁵, graptólitos⁶, gastrópodos e bivalves. Extinguiu 1/3 das famílias de braquiópodos e briozoários, principalmente aquelas constituídas por espécies en-

⁵ São os mais antigos equinodermos vivos. Floresceram durante o Paleozóico (BARNES, 1984).

⁶ Organismos coloniais pertencentes à classe Graptolithina do filo Hemichordata, que habitaram os mares do Paleozóico. Surgiram no Cambriano superior (BARNES, 1984).



dêmicas, bem como numerosos grupos de conodontes⁷, trilobitas e graptólitos. No total, mais de cem famílias de invertebrados marinhos foram extintas. Após, houve a recolonização lenta dos ambientes marinhos, a partir do Siluriano inferior (440 m. a.), por formas sobreviventes generalistas e com baixa diversidade, não ocorrendo, dessa forma, uma inovação biológica significativa (ERWIN, 1998).

- Devoniano superior (374,5 m. a. – 359,2 m. a.)

Muitas evidências têm sugerido a ocorrência de um episódio de extinção em massa há cerca de 360 m. a., no limite Frasniano-Fameniano, incluindo impacto extraterrestre, flutuações eustáticas e alastramento de águas anóxicas, alterações climáticas e resfriamento global. Não existem provas suficientes para atribuir a essa catástrofe uma única causa, sendo, portanto, provavelmente devida a uma combinação de diversos fatores (GASTON; SPICER, 2004). Essa catástrofe afetou principalmente comunidades marinhas, em especial os corais recifais, de tal forma, que esse grupo permaneceu raro até o surgimento dos corais modernos no Mesozóico. Em torno de 70% dos invertebrados marinhos foram extintos. Entre os grupos mais seriamente afetados estão os braquiópodos, trilobitas, conodontes, acritarcos⁸, agnatos e placodermos. A complexidade da substituição pós-extintional indica o predomínio de faunas generalistas e comunidades simples (ERWIN, 1998).

- Limite Permo-Triássico (251 m. a.)

É considerada a maior extinção do Fanerozóico, tendo provocado o desaparecimento de 95% das espécies marinhas e 70% das espécies terrestres. Existem evidências de que esse episódio coincide com hipóxia ou anóxia oceânica, trans-

⁷ Um grupo primitivo de cordados pelágicos (BARNES, 1984).

⁸ Grupo polifilético de algas unicelulares eucariontes reunidas em uma categoria informal, em 1963, por William Evitt (CRUZ, 2000).



gressão marinha e mudanças climáticas causadas por vulcanismo. Embora não se possa afirmar que essa megaextinção tenha sido devida a uma causa exclusiva, a hipótese dos baixos níveis de oxigênio oceânico é sustentada por provas sedimentológicas, paleoecológicas, geoquímicas e por biomarcadores (TWITCHETT, 2006). Os principais grupos afetados foram, no ambiente marinho, foraminíferos, trilobitas, corais, blastóides⁹, briozoários, braquiópodos, amonóides, crinóides, eurypterídeos, ostracodes, equinodermos, acantódios¹⁰ e peixes. No ambiente terrestre, os pelicossauros. A substituição faunística ocorrida ao longo do Triássico inferior (251 m. a. – 245 m. a.) aponta a preponderância de faunas generalistas, cosmopolitas e de comunidades estruturalmente simples, com baixa diversidade (ERWIN, 1998).

- Triássico superior (210 m. a. – 199,6 m. a.)

Apesar desse episódio extintional ter afetado a vida tanto no ambiente terrestre quanto no marinho, ainda restam dúvidas sobre se pode ser considerado realmente uma extinção em massa. Os padrões de causalidade permanecem indeterminados, ainda que as principais hipóteses sejam o impacto de um objeto extraterrestre e o resfriamento global, seguidos de mudanças atmosféricas, tais como partículas de poeira em abundância, fumaça, vapor d'água e dióxido sulfúrico (GASTON; SPICER, 2004). Causou o desaparecimento de 58 famílias de cefalópodos, uma redução dramática dos conodontes, o declínio acentuado dos ostracodes, extinguiu metade dos gêneros de bivalves, afetou severamente corais recifais, braquiópodos, gastrópodos e dizimou 13 famílias de répteis marinhos. No ambiente

⁹ Pequeno grupo de equinodermos sésseis. São comuns nos sedimentos carboníferos (BARNES, 1984).

¹⁰ Grupo de “peixes” mandibulados contemporâneos dos Placodermos, comuns no Devoniano (POUGH, *et al.*, 1999).



terrestre, ao fim do Carniano (218 m. a.), eliminou várias famílias de diápsidos¹¹ e, no Retiano (203 m. a. – 199 m. a.), 6 famílias de sinápsidos.¹² O exame do limite Triássico-Jurássico revela que entre as pteridófitas, Glossopteridaceae, Peltaspermaeae e Corystospermaceae haviam se tornado extintas. Outrossim, 35 famílias de insetos e 8 famílias de peixes ósseos límnicos foram suprimidas. Posteriormente ao episódio extintional, ocorreu um crescimento estável ao longo do Hettangiano (199,6 m. a. – 196,5 m. a.) e um baixo crescimento durante o Pleinsbachiano (189,6 m. a. – 183,0 m. a.). A substituição faunística não se afigura clara (ERWIN, 1998).

- Limite Cretáceo-Terciário (65,6 m. a.)

A mais famosa de todas as extinções em massa aniquilou pelo menos 50, 60 ou talvez até 75% das espécies, sendo os grupos extintos mais conhecidos, os dinossauros, os pterossauros e os répteis marinhos. Além desses, elidiu também belemnóides¹³, muitas espécies de plantas, exceto samambaias e plantas com sementes, amonóides¹² e bivalves rudistas. Outros grupos atingidos foram: foraminíferos planctônicos, nanoplâncton calcáreo, diatomáceas, dinoflagelados, braquiópodos¹⁴, moluscos, equinóides¹⁵ e peixes. Notavelmente, muitos grupos de mamíferos, tartarugas, aves, crocodilos, lagartos, serpentes e anfíbios não foram prejudicados (ERWIN, 1998). O impacto de grandes corpos extraterrestres com a Terra é compreendido como o maior responsável pela extinção global ocorrida no limite K-T, embora não haja uma associação direta com o evento extintional propriamente dito. Segundo Twitchett (2006), Alvarez e colaboradores propuseram, em

¹¹ Tetrápodos que possuem dois pares de fenestras temporais no crânio.

¹² Tetrápodos que possuem um par de fenestras temporais no crânio.

¹³ Grupo extinto de cefalópodos (BARNES, 1984).

¹⁴ Filo de lofoforados que lembra os moluscos bivalves (BARNES, 1984).

¹⁵ São equinodermos de movimentos livres comumente conhecidos como ouriços-do-mar (BARNES, 1984).



1980, duas hipóteses relacionadas, mas não necessariamente dependentes: que o impacto de um bólido ocorreu no limite K-T e que esse bólido causou a extinção em massa. A primeira hipótese tem sido corroborada por inúmeros estudos subsequentes, mais notavelmente a identificação de vestígios de uma cratera com 180 a 300 km de diâmetro, localizada em Chicxulub, México, e uma riqueza de evidências geológicas associadas (quartzos de choque, tectitos, depósitos de tsunamis, etc). Todavia, para concluir que o choque tenha sido o causador da extinção, dois conjuntos de dados devem ser considerados: a inequívoca evidência de extinção geologicamente instantânea, bem como a clara coincidência do impacto do meteoro com o horizonte extintional. Como referido em páginas anteriores, contudo, novos estudos sugeriram que a colisão parece ter ocorrido 300 k. a. antes do limite K-T. Mais uma vez, a controvérsia ganha novo fôlego. O Paleoceno inferior (65,5 m. a. – 61,7 m. a) revela táxons oportunistas imediatos, seguidos por uma substituição ecológica gradativa de formas generalistas por formas mais especializadas.

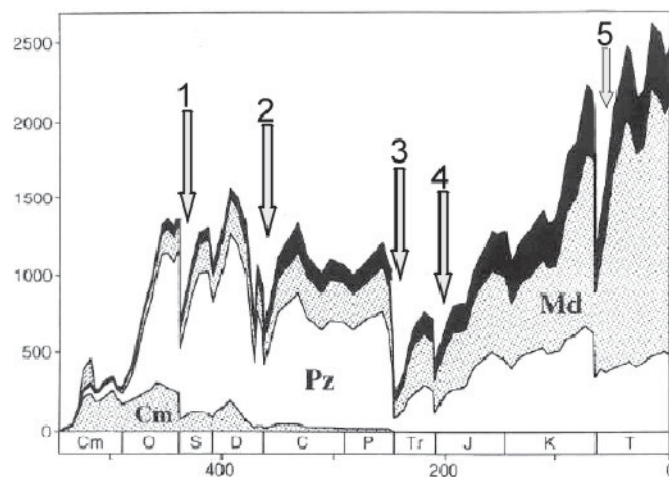


Figura 2. As cinco grandes extinções em massa ocorridas ao longo do Fanerozóico: 1 – Extinção do Ordoviciano superior; 2 – Extinção do Devoniano superior; 3 – Extinção do limite Permo-Triássico; 4 – Extinção do Triássico superior; 5 – Extinção do limite Cretáceo-Terciário (adaptado de RAUP; SEPKOSKI, 1982).



O PRELÚDIO DE UMA CATÁSTROFE ANUNCIADA

Os mamíferos, como todos os demais seres vivos, sofreram com a extinção do K-T, e estima-se que dois terços de suas espécies foram aniquilados. Contudo, os sobreviventes herdaram a Terra. Dessa forma, no Eoceno inferior, há aproximadamente 50 m. a., já haviam surgido as 20 ordens de mamíferos placentários existentes hoje em dia, concomitantemente com diversas ordens atualmente extintas. Conquanto os mamíferos tenham assumido a posição de vertebrados terrestres dominantes após o desaparecimento dos dinossauros, também enfrentaram grandes desafios evolutivos. O clima atual é bastante diferente do que foi no início do Cenozóico. Os primeiros dez milhões de anos experimentaram um gradual aquecimento do planeta, devido ao aumento de carbono atmosférico expelido por vulcões. Mas, a partir dos últimos 50 m. a., a Terra nunca mais seria tão quente, ocorrendo apenas picos ocasionais de aquecimento. Surpreendentemente, o soerguimento da cordilheira do Himalaia parece ter sido o responsável por esse gradual resfriamento da temperatura global. As chuvas, agora caíam nas encostas recém-formadas, dissolvendo o CO₂ e carreando o carbono para enterrá-lo no mar, ocasionando a queda da temperatura média do planeta. Com o decréscimo do CO₂ atmosférico há cerca de 10 m. a., as gramíneas foram as principais beneficiadas, substituindo as florestas temperadas e avançando sobre as florestas tropicais. Esse é o panorama apresentado por Zimmer (2003). Evidentemente, o processo de fragmentação florestal teve consequências dramáticas sobre os mamíferos em geral e, particularmente, sobre os primatas, resultando, há cerca de 7 m. a., no surgimento de formas terrícolas. O desfecho dessa história inicia-se com a dispersão dos primeiros hominíneos cursoriais – *Homo erectus* – a partir da África, e o surgimento de *Homo sapiens*, entre 200 k. a. e 165 k. a. Os primeiros rumores da sexta extinção datam de 50 k. a. e coincidem com a chegada dos humanos à Austrália. A sobreexploração de recursos tem aí o seu primeiro registro. Implicou o desaparecimento de gigantes tais como *vombats* de uma tonelada, cangurus de 3 m



de altura, lagartos de 9 m (ZIMMER, 2003) e, em especial, de uma ave ratita de noventa quilos, *Genyornis*, cujos fragmentos de ovos desapareceram do registro subitamente (MILLER *et al.*, 1999). Esse impacto vitimou vários outros grupos nos 40 k. a. subseqüentes, tais como mamutes e preguiças gigantes, extintos há aproximadamente 12 k. a. Uma nova onda extincional de dimensões catastróficas atingiu o planeta, quando, há 11,4 k. a. (segundo MORDECHAI *et al.*, 2006), a primeira espécie vegetal silvestre foi domesticada por agricultores do Neolítico, o figo da Palestina (*Ficus caricas*). Prenunciava-se, nesse momento, a crise ambiental que ora assola a Terra. Dois outros episódios recentes agravaram ainda mais o cenário: as grandes navegações ocorridas a partir do séc. XV e a Revolução Industrial, que rompeu definitivamente as relações econômicas e culturais pré-existent de exploração da natureza.

A CRISE ATUAL

A perda de biodiversidade decorrente das atividades antrópicas configura-se, hoje, no sexto evento de extinção em massa, provavelmente o mais severo de todos. Para que se possa avaliar a dimensão do problema, entretanto, é necessário conhecer o número de espécies existente no planeta e a taxa atual de extinção, de modo que se possa compará-la com episódios do passado, cujas evidências provêm do registro fóssil.

O conhecimento sobre a biota ampliou-se consideravelmente na medida em que o ser humano desenvolveu tecnologias e se tornou capaz de atingir os ambientes mais remotos como o dossel das florestas tropicais e as regiões abissais dos oceanos. O paradoxal é que ao passo em que uma fração da biodiversidade vai sendo desvendada, quantidade inestimável vai sendo perdida antes mesmo de se tornar conhecida. São linhagens, histórias de vida singulares que vêm desaparecendo em velocidade inigualável. De acordo com IUCN (2006), somam 16.119 as espécies ameaçadas de extinção, o que representa uma subestimativa, consideran-



do que esse montante se refere a menos de 3% do total de 1,8 milhões de espécies descritas. Isso demonstra que apenas uma pequena proporção da biodiversidade descrita foi efetivamente avaliada e que, em grande parte, diz respeito a vertebrados e plantas, em particular, daquelas espécies provenientes de certas regiões do planeta onde se concentram interesses e esforços de pesquisa. No que tange aos referidos grupos, justamente os mais bem conhecidos e estudados, o percentual de ameaça varia de 12% em aves a 52% em cicadófitas, certo agrupamento de gimnospermas (BAILLIE *et al.*, 2004). A Lista Vermelha da IUCN de 2006 inclui, para um período de cerca de meio milênio (desde 1500), 784 extinções documentadas (quando não resta dúvida sobre a morte do último indivíduo da espécie) e 65 extinções na natureza (quando a espécie sobrevive apenas em condições de cultivo, em cativeiro ou como populações naturalizadas fora de sua área de distribuição original). Ainda conforme dados da IUCN, pelo menos 27 dessas extinções ocorreram nos últimos vinte anos. Tais valores, seguramente, estão muito aquém da realidade, posto que a maioria das espécies permanece, ainda, no anonimato para a ciência ou é exiguamente conhecida. Além disso, a confirmação da extinção de uma espécie pode levar muitos anos. Espécies de grandes dimensões, por exemplo, devido à prolongada longevidade dos indivíduos podem persistir durante um bom tempo, mesmo após as populações às quais pertencem terem se tornado inviáveis e perdido a propriedade de auto-sustentabilidade.

Gaston; Spicer (2004) mencionam que o padrão geral de mudança na biodiversidade ao longo do tempo resulta da diferença entre taxas de especiação e taxas de extinção. Se espécies estão surgindo mais rapidamente do que se tornam extintas, então a biodiversidade aumenta. Por outro lado, quando a taxa de extinção equivale a de especiação, o padrão geral resultante é de estabilidade (estase evolutiva), o que não significa ausência de mudança, uma vez que embora o número de táxons se mantenha constante o mesmo não ocorre com sua identidade (as espécies substituem-se umas às outras). Contudo, quando a taxa de extinção supera a de especiação, a biodiversidade declina e, persistindo o quadro, a escala



de perdas se magnifica. Baillie *et al.* (2004) afirmam que a taxa atual de extinção de longe ultrapassa a taxa obtida a partir da análise do registro fóssil. Estimativas baseadas na extinção de espécies de aves, mamíferos e anfíbios no último século indicam que a extinção do Recente é 50 a 500 vezes maior que a informada no registro geológico. Ressaltam, ainda, que se espécies provavelmente extintas forem incluídas na análise, a amplitude da velocidade aumenta para 100 a 1.000 vezes. Segundo Townsend *et al.* (2006), ponderando-se que o tempo médio de existência de cada espécie varia de um a 10 milhões de anos e supondo-se, a partir de cálculos conservadores, que a riqueza global de espécies gire em torno de 10 milhões, a previsão é de que a extinção média por século ficasse entre 100 e 1.000 espécies (0,001-0,01%). Porém, ressaltam os autores que a taxa atual de extinção de aves e mamíferos é de cerca de 1% por século, ou seja, 100 a 1.000 vezes superior à taxa de extinção de fundo.

A tendência geral, ao longo do tempo geológico, exceto nos períodos de extinção em massa, tem sido de incremento na biodiversidade, conforme apontam Gaston; Spicer (2004). Entretanto, alertam os autores que o Quaternário Superior tem se caracterizado por acentuado declínio na biodiversidade, associado, direta ou indiretamente, às atividades antrópicas. Tais perdas, indubitavelmente, decorrem da redução geral na heterogeneidade biológica, com efeitos perceptíveis desde uma escala genética à ecossistêmica. As conseqüências, em termos funcionais, principalmente neste último nível, têm sido desastrosas, em especial, por seu caráter de irreversibilidade.

Vive-se um período de mudanças ambientais sem precedentes, fato este inquestionável. A polêmica gira em torno das causas e efeitos dessas mudanças. Talvez o mais amplamente discutido impacto antrópico sobre a biodiversidade seja a extinção de espécies, capaz de sensibilizar a opinião pública, sobretudo quando se trata de espécies carismáticas, dotadas de extraordinária beleza e traços comportamentais com os quais as pessoas se identificam.



As atividades humanas que direta ou indiretamente afetam o ambiente diferem na magnitude e no grau do seu impacto. Atividades diretas tais como a caça amadora ou com fins comerciais, que podem levar à sobreexploração, em geral direcionam-se para certas espécies que despertam grande interesse seja pelo valor econômico ou cultural de seus atributos, seja por suas características supostamente indesejáveis. Tais atividades, por suas especificidades, conduzem à drástica redução da espécie-alvo e de espécies estreitamente associadas. As atividades indiretas, por sua vez, que ocasionam a destruição e poluição dos habitats, tendem a ser não seletivas, atingindo uma ampla gama de espécies simultaneamente.

A influência humana sobre a vida silvestre potencializa-se na medida em que os meios de exploração dos recursos se tornam cada vez mais precisos e eficientes. A Lista Vermelha da IUCN de 2006 reafirma a tendência de aumento da perda de biodiversidade, apesar dos esforços de conservação e da meta estabelecida mundialmente no sentido de reduzir substancialmente a perda de diversidade biológica até 2010. Embora algumas espécies respondam positivamente às pressões antrópicas, a grande maioria demonstra restrita tolerância às alterações ambientais rápidas e globalizantes. De acordo com Baillie *et al.* (2004), os mais dramáticos impactos de origem antropogênica sobre a biodiversidade consistem na destruição de habitats e processos de fragmentação e degradação associados, invasão de espécies exóticas, sobreexploração e mudança climática. Para tratar dessas questões, serão tomados como base, fundamentalmente, certos dados quantitativos e reflexões apresentados por Primack; Rodrigues (2001), Baillie *et al.* (2004), Gaston; Spicer (2004), IUCN (2006).

Modificações nas características físicas e biológicas dos ambientes lideram as causas de extinção no mundo inteiro. Estima-se que em torno de 40% dos 60 milhões de quilômetros quadrados de cobertura florestal tenham sido perdidos em decorrência das ações humanas praticadas desde épocas remotas. Tais perdas prosseguem, resultando na destruição de cerca de 14,6 milhões de hectares de



florestas ao ano. Nos anos 90, essa redução chegou a 4,2% e foi mais intensa na África e América do Sul. As taxas de desmatamento variam muito entre países, mas taxas anuais notadamente altas são registradas em países tropicais, tais como o Vietnã, Paraguai, México, Costa do Marfim e Costa Rica. A destruição e degradação de habitats representam a mais grave ameaça em nível global, particularmente, para a fauna terrestre de anfíbios, aves e mamíferos, atingindo mais de 85% das espécies sob risco nesses grupos. A razão disso está na distribuição tropical de grande parte dessas espécies, onde a mais dramática perda de habitats vem transcorrendo com o desflorestamento e a ampliação das fronteiras agrícolas.

A perda de habitats, porém, é um sintoma mais amplo, que não se restringe ao desflorestamento. A maior parte da superfície terrestre e, de forma progressiva, dos oceanos, passou ou vem passando à esfera da gestão humana. Aproximações sobre a extensão das áreas naturais convertidas, desde que as perturbações de causa antrópica se tornaram expressivas, revelam reduções de 49% para o conjunto das formações de estepe, savana ou campo, 74% para zonas arbustivas e 14% no que se refere à tundra, desertos quentes e frios. Cultivos agrícolas cobrem por volta de 11% da superfície terrestre e áreas de pastagem, 23%. O fato é que a humanidade tem deixado suas marcas mesmo naquelas regiões aparentemente mais longínquas do planeta, que pareciam imunes à sua influência. Surpreende que nem mesmo os desertos e terras áridas, aparentemente intocados, estejam realmente fora do domínio humano. A biota única dessas regiões compõe também o rol das mais raras e ameaçadas. Este é o caso da Caatinga, bioma de elevada complexidade e grau de endemismo, onde vivem 15% da população brasileira cuja subsistência depende de práticas não sustentáveis como a agricultura de corte e queima, o corte de madeira para lenha, a caça de animais e a contínua remoção da vegetação para a criação de bovinos e caprinos (LEAL *et al.*, 2005).

Evidências parciais sugerem que este é um sério problema para peixes de água doce e que também afeta, consideravelmente, espécies marinhas. Peixes de



água doce sofreram decréscimo acentuado: 56% das 252 espécies endêmicas do Mediterrâneo estão sob ameaça de extinção, enquanto no leste da África, onde grande parte da proteína animal consumida provém da pesca, os impactos atingem 28% das espécies. Os principais fatores responsáveis são as atividades humanas nas margens dos cursos hídricos, que compreendem a remoção das matas ripárias, poluição, eutrofização, represamento e canalização.

De forma deliberada ou acidental, os seres humanos têm transportado espécies pelo mundo inteiro, introduzindo-as em áreas onde originalmente não existiam, transpondo as barreiras naturais que impediam sua dispersão e que, ao longo de milhares de anos, determinaram a diversidade de padrões evolutivos encontrada no planeta.

Espécies exóticas, em geral, não conseguem se estabelecer com sucesso nos ambientes em que são introduzidas, posto que as características físicas e biológicas destes diferem daquelas nas quais evoluíram. Contudo, quando a ocupação é bem sucedida, a espécie invasora se torna um agente de mudanças e uma efetiva ameaça à biodiversidade autóctone. Espécies invasoras podem deslocar ou extinguir espécies nativas através de competição por limitação de recursos, predação, disseminação de doenças ou em decorrência de severas modificações no habitat. Têm sido identificadas como a razão do decréscimo de espécies ameaçadas de aves, anfíbios e mamíferos, em 30%, 11% e 8%, respectivamente. Espécies insulares são notavelmente suscetíveis a invasões biológicas pela sua história evolutiva em isolamento. Aproximadamente 67% da avifauna ameaçada em ilhas oceânicas sofrem direta ou indiretamente com este tipo de impacto, comparativamente aos 17% evidenciados em ilhas continentais e apenas 8% nos continentes. São inúmeros os casos de introduções em que as espécies se alastram em ritmo alarmante, tornando-se pragas e causando sérios prejuízos econômicos. Nos EUA, o custo estimado com o controle e reparação de danos causados por espécies invasoras ultrapassa 138 bilhões de dólares anualmente (PIMENTEL *et al.*,



2005). E o pior efeito a se esperar: a homogeneização das biotas através do planeta. A globalização não se dá apenas no campo cultural ou econômico, é também biológica! De forma assustadora, os ecossistemas vêm perdendo sua identidade, empobrecendo e apresentando biotas que se assemelham cada vez mais.

Desde suas origens, assim como qualquer outra espécie no mundo animal, os seres humanos fizeram uso da biodiversidade e de outros recursos naturais de forma a garantir, inicialmente, sua sobrevivência e, com o passar do tempo, a manutenção de sistemas econômicos e culturais baseados na aquisição e acumulação crescente de bens. Muitas sociedades tradicionais impunham uma série de restrições ao uso de recursos comuns, de forma a viabilizar o acesso a tais recursos em longo prazo. Todavia, o crescimento da população humana gerou, por sua vez, aumento na demanda por recursos. Além disso, o aprimoramento dos métodos de coleta tornou a exploração muito mais eficiente e intensa, sem base sustentável. A exploração excessiva de certos componentes da biodiversidade já levou várias espécies ao declínio e à extinção local, mesmo em sociedades pré-industriais. Este tipo de impacto atinge 33% das espécies de mamíferos ameaçadas, 30% das aves e 6% dos anfíbios.

A Lista Vermelha da IUCN de 2004 indica que 250 espécies ameaçadas de mamíferos estão sujeitas à sobreexploração, especialmente ungulados e carnívoros. São freqüentemente utilizados como fonte protéica, principalmente na África e sudeste asiático. A ameaça às aves, embora predominante na Ásia, de forma geral está presente em todos os países e territórios, seja pela caça, seja pela captura e manutenção em cativeiro. Quanto aos anfíbios ameaçados pela sobreexploração, em sua maioria, são utilizados como fonte de alimento ou produção de medicamentos na Ásia, ou comercializados como animais de estimação em Madagascar. O uso abusivo de recursos representa grave impacto, também, para quelônios, em particular no leste e sudeste asiático, e para peixes marinhos. Tubarões e raias, espécies de crescimento lento, são excepcionalmente vulneráveis à pesca comercial



em larga escala e estão desaparecendo no mundo inteiro a um ritmo sem precedentes.

Mais uma vez, ao longo de sua história, o planeta passa por profundas mudanças climáticas. A diferença, desta vez, está na rapidez com que vêm ocorrendo, restando poucas dúvidas sobre sua associação com as atividades antrópicas, sobretudo com a queima de combustíveis fósseis. Até então, poucas espécies tiveram seu declínio comprovadamente relacionado com tais mudanças, mas existem inúmeros exemplos que demonstram a influência deste tipo de impacto sobre a biodiversidade em várias regiões do mundo e que, tomados em conjunto, fornecem incontestáveis evidências quanto aos seus efeitos catastróficos. Mudanças climáticas acarretam alterações na distribuição e abundância dos organismos, na periodicidade de eventos biológicos, entre outras. No que se refere à fauna ameaçada de anfíbios, sabe-se que cerca de 29% das espécies são afetadas pela poluição (incluindo o aquecimento global) e 17% por doenças de origem fúngica, principalmente. A interação entre esses dois fatores tem sido cogitada como a principal hipótese explicativa para o decréscimo planetário dos anfíbios.

EXTINÇÕES DO PASSADO E A CRISE ATUAL: ANALOGIAS POSSÍVEIS

Conservar o atual estoque da biodiversidade representa preservar a história da vida, pois cada espécie constitui uma faceta filogenética dos cenários evolutivos do passado, presente e futuro. Assim, um olhar sobre o tempo geológico permite enxergar além dos padrões quantitativos de substituição faunística. Possibilita compreender os processos envolvidos nos períodos de extinção de fundo e, principalmente, nos episódios de extinção em massa. Dessa abordagem, emergem não apenas respostas, mas perguntas essenciais à preservação da diversidade da vida:



- Que características apresentam espécies tolerantes aos impactos antrópicos?
- Que características ecológicas diferenciam ecossistemas significativamente alterados daqueles menos perturbados?
- É o declínio das espécies gradual e previsível ou há um limiar além do qual o colapso se torna irreversível?
- Foram as atuais mudanças moldadas por processos evolutivos ocorridos em longo prazo?
- Seria possível atribuir a uma única espécie impacto de tamanha magnitude?
- A taxa evolutiva está mudando?

Conquanto ainda existam alguns questionamentos acerca da grandeza do atual episódio extintional, é possível estabelecer analogias com os cinco eventos megaextintionais do pretérito, como destruição de habitats e extinção, invasão de espécies e homogeneização biótica. No passado, a causa comum de extinções tem sido a destruição de habitats, ocasionada por cataclismos planetários ou extraterrestres. Hoje, o principal agente responsável pela destruição de habitats parece ser a ação antrópica predatória, exemplificada pelo desflorestamento e pela poluição em suas diversas expressões. Assim como ocorrido nas cinco extinções em massa anteriores, importa menos a aptidão prévia e mais o acaso. Por exemplo, o derrame acidental de óleo, que afeta determinada comunidade aquática e não outra, a decisão de uma empresa de se instalar em uma região ou noutra em função dos subsídios oferecidos, ou, ainda, as diretrizes políticas de distintos governos que incentivam a sobreexploração de determinados recursos em função das oscilações dos mercados interno e externo. Conseqüentemente, de modo estocástico, espécies podem sobreviver ou sucumbir, pois nenhuma é capaz de resistir ao desaparecimento de seu habitat.



Algumas espécies apresentam determinadas características que as predis põem mais à extinção do que outras, principalmente, durante períodos com taxas extintionais normais. Porém, essas características parecem ter uma menor importância durante episódios catastróficos. Assim, conforme mencionado, organismos com desenvolvimento embrionário precoce e ampla distribuição geográfica não diferem quanto à sobrevivência quando submetidos a um cataclismo, mas são favorecidos durante a recolonização pós-extintional. Da mesma forma, espécies cujos indivíduos apresentam gestação breve e pequeno porte (resultado de processos pedomórficos¹⁶), quando comparadas a espécies de megafauna, são igualmente afetadas durante a catástrofe, mas beneficiadas logo após. Táxons generalistas, de níveis tróficos inferiores e de comunidades simples, apresentam as mesmas chances de sobrevivência que táxons especialistas de comunidades maduras, quando têm seus habitats destruídos, mas levam vantagem no processo de recolonização. Grupos com elevada riqueza de espécies não diferem quanto às taxas de sobrevivência em períodos de extinção de fundo e de extinção em massa. Infere-se, então, que justamente os táxons com desenvolvimento embriológico precoce, indivíduos pequenos, abrangência geográfica ampla, generalistas e constituintes de comunidades simples alcançam mais rapidamente a hegemonia após a extinção, recolonizando as zonas adaptativas disponíveis. No futuro, provavelmente, serão estes os que herdarão a Terra após mais uma extinção em massa.

A translocação de espécies, seja por razões acidentais ou intencionais, tornou-se a segunda maior causa de extinção, por conduzir à chamada homogeneização biótica. Magnusson (2006) esboça panorama perturbador a respeito do tema e de seus efeitos, muitas vezes imprevisíveis em escala local, mas inexoráveis em nível global, no que se refere à perda de diversidade biológica. Para compreender

¹⁶ Retenção das formas ancestrais juvenis em estágios posteriores da ontogenia dos descendentes (HICKMAN *et al.*, 2004).



o problema, é necessário investigá-lo em distintos níveis, pois os resultados podem parecer contraditórios, dependendo da escala espacial ou temporal analisada. Sabe-se que as invasões superam as extinções de espécies em ilhas no mundo inteiro, o que levaria o leitor a pensar, então, que o processo conduz ao aumento de biodiversidade. Sofisma digno de Protágoras (480-410 a.C.)! Embora aumente o número de espécies por ilha, como há pouca variação entre as espécies capazes de invadi-las, é improvável que compensem o número total de espécies insulares extintas. Logo, para entender a real magnitude das bioinvasões é essencial pensar globalmente. Ao longo do tempo, o aumento da dispersão pode diminuir a riqueza de espécies em determinada região. Evidências disso podem ser encontradas, também, em tempos remotos, no registro fóssil. Os dinossauros foram hegemônicos durante cerca de 140 m. a., superando os mamíferos em diversidade de hábitos, habitats e, até mesmo, de tamanho. A diversidade específica, no entanto, foi inferior, porque esses majestosos répteis ocupavam um só continente, o Pangea, cujas biotas eram essencialmente idênticas. A atual diversidade de mamíferos terrestres deve-se, em grande parte, ao isolamento dos continentes após a fragmentação do Pangea. Processo inverso aconteceu na América, nos últimos 3 m. a., quando a travessia Bolívar finalmente desapareceu e se formou o istmo do Panamá. Tendo ficado a América do Sul isolada durante aproximadamente 60 m. a., depois de seu afastamento do continente antártico, transformou-se em megalaboratório gerador de endemismos. Esse longo experimento evolutivo só foi interrompido pelo estabelecimento do grande intercâmbio americano, que provocou acentuadas extinções em ambos os continentes. Assim como o istmo do Panamá, a espécie humana está rompendo o isolamento pós-pangea. A diferença está na escala temporal envolvida: no primeiro caso, a invasão se deu num intervalo geológico de tempo, no segundo, num piscar de olhos do tempo profundo.

Vive-se um momento de crise, de ruptura de paradigmas e de incertezas planetárias enquanto se assiste ao rápido declínio da atual biodiversidade. Deve-



se ter a clareza de que a extinção de uma única espécie não representa uma perda isolada, mas um sintoma de um processo mais amplo, de que habitats e comunidades inteiras estão desaparecendo. Essas perdas tornam-nos, enquanto espécie, cada vez mais vulneráveis, mais egoístas e, fundamentalmente, mais sozinhos (CADEMARTORI, 2006).

REFERÊNCIAS

- ALVAREZ, L. W.; ALVAREZ, W.; ASARO, F.; MICHEL, H. V. Extraterrestrial cause for the Cretaceous-Tertiary extinction: experimental results and theoretical interpretation. **Science**, v. 208, p. 1095-1108, June 1980.
- BAILLIE, J. E. M.; HILTON-TAYLOR, C.; STUART, S. N. **2004 IUCN Red List of Threatened Species: a global species assessment**. Cambridge, UK: IUCN, 2004. 191 p. Disponível em: <http://www.iucn.org/themes/ssc/red_list_2004/GSA_book/Red_List_2004_book.pdf>. Acesso em: 05 jun. 2006.
- BARNES, R. D. **Zoologia dos invertebrados**. 4. ed. São Paulo: Roca, 1984. 1179 p.
- CADEMARTORI, C. V. Conservação da biodiversidade e desenvolvimento. In: PENNA, R.; TOALDO, A. M. M. & SABEDOT, S. (orgs). **Conhecimento, sustentabilidade e desenvolvimento regional**. Canoas: Unilasalle, 2006. p. 89-106.
- CRUZ, N. M. da C. Acritarcos. In: CARVALHO, I. de S. (ed). **Paleontologia**. Rio de Janeiro: Interciência, 2000. p. 223-227.
- DARWIN, C. **A origem das espécies**. Rio de Janeiro: Ediouro, 2004. 517 p.
- ERWIN, D. H. The end and the beginning: recoveries from mass extinctions. **TREE**, v. 13, n. 9, p. 344-349, Sep. 1998.
- FREIRE-MAIA, N. **Teoria da evolução: de Darwin à Teoria Sintética**. Belo Horizonte: Itatiaia; São Paulo: EDUSP, 1988. 415 p.
- FUTUYMA, D. J. **Biologia evolutiva**. 2. ed. Ribeirão Preto, SP: FUNPEC, 2002. 631 p.



- GASTON, K. J.; SPICER, J. I. **Biodiversity**: an introduction. 2. ed. Malden, USA: Blackwell, 2004. 191 p.
- GOULD, S. J.; ELDREDGE, N. Punctuated equilibria: The tempo and mode of evolution reconsidered. **Paleobiology**, v. 3, p. 115-151, 1977.
- HICKMAN, C. P.; ROBERTS, L. S.; LARSON, A. **Princípios integrados de zoologia**. 11. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2004. 846 p.
- IUCN. 2006. Release of the 2006 IUCN Red List of Threatened Species reveals ongoing decline of the status of plants and animals. Disponível em: <http://www.iucn.org/en/news/archive/2006/05/02_pr_red_list_en.htm>. Acesso em: 16 jun. 2006.
- JABLONSKI, D. Background and mass extinctions: the alternation of macroevolutionary regimes. **Science**, v. 231, p. 129-133, Jan. 1986.
- KASTING, J. F. Quando o metano ditava o clima. **Scientific American**, Brasil, n. 28, p. 38-45, set. 2004.
- KELLER, G.; ADATTE, T.; STINNESBECK, W.; REBOLLEDO-VIEYRA, M.; FUCUGAUCHI, J.U.; KRAMAR, U.; STUBEN, D. Chicxulub impact predates the K-T boundary mass extinction. **PNAS**, v. 101, p. 3753-3758, 2004.
- LEAL, I. R.; SILVA, J. M. C. da; TABARELLI, M.; LACHER JR., T. E. Mudando o curso da biodiversidade da Caatinga do Nordeste do Brasil. **Megadiversidade**, v. 1, n. 1, p. 139-146, jul. 2005.
- MAGNUSSON, W. E. Homogeneização biótica. In: ROCHA, C. F. D. *et al.* (orgs). **Biologia da conservação**: essências. São Carlos: RiMa, 2006. p. 211-229.
- MAYR, E. **O desenvolvimento do pensamento biológico**: diversidade, evolução e herança. Brasília: Universidade de Brasília, 1998. 1107 p.
- MILLER, G. H.; MAGEE, J. W.; JOHNSON, B. J.; FOGEL, M. L.; SPOONER, N. A.; McCULLOCH, M. T.; AYLIFFE, L. K. Pleistocene extinction of *Genyornis newtoni*: human impact on Australian megafauna. **Science**, v. 283, n. 5399, p. 205-208, Jan. 1999.



- MORDECHAI, E. K.; HARTMANN, A.; BAR-YOSEF, O. Early domesticated fig in the Jordan Valley. **Science**, v. 312, p. 1372-1374, Jun. 2006.
- PIMENTEL, D.; ZUNIGA, R.; MORRISON, D. Update on the environmental and economic costs associated with alien-invasive species in the United States. **Ecological Economics**, v. 52, p. 273-288, 2005.
- POPE, K. O.; OCAMPO, A. C.; DULLER, C. E. Mexican site for K/T impact crater? **Nature**, v. 351, p. 105, May 1991.
- POUGH, F. H.; HEISER, J. B.; MCFARLAND, W. N. **A vida dos vertebrados**. 2. ed. São Paulo: Atheneu, 1999. 798 p.
- PRIMACK, R. B.; RODRIGUES, E. **Biologia da conservação**. Londrina: E. Rodrigues, 2001. 327 p.
- RAUP, D. M. **Extinction: bad genes or bad luck?** New York: W. W. Norton, 1991. 228 p.
- RAUP, D. M.; SEPKOSKI, J. J. JR. Mass extinctions in the marine fossil record. **Science**, v. 215, p. 1501-1503, 1982.
- _____. Periodicity of extinctions in the geologic past. **PNAS**, v. 81, n. 3, p. 801-805, Feb. 1984.
- RAUP, D. M.; STANLEY, S. M. **Principles of paleontology**. 2. ed. San Francisco: W. H. Freeman, 1978. 481 p.
- RIDLEY, M. **Evolução**. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2006. 752 p.
- SCHINDEWOLF, O. H. Neokatastrophismus? **Zeits. Deutsch. Geol. Res.**, v. 114, p. 430-435, 1963.
- SOLÉ, R. V.; MANRUBIA, S. C.; BENTON, M.; BAK, P. Self-similarity of extinction statistics in the fossil record. **Nature**, v. 388, p. 764-767, Aug. 1997.
- TAYLOR, P. D. Extinction and the fossil record. In: TAYLOR, P. D. (ed.). **Extinctions in the history of life**. Cambridge: Cambridge University, 2004. p. 1-34.
- TOWNSEND, C. R.; BEGON, M.; HARPER, J. L. **Fundamentos em ecologia**. 2. ed. Porto Alegre: ArtMed, 2006. 592 p.



TWITCHETT, R. The palaeoclimatology, palaeoecology and palaeoenvironmental analysis of mass extinctions events. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 232, p. 190-213, 2006.

ZIMMER, C. **O livro de ouro da evolução: o triunfo de uma idéia**. Rio de Janeiro: Ediouro, 2003. 598 p.

