

# Extinções massivas e o clima

J. A. de Freitas Pacheco

*Observatoire de la Côte d'Azur, França*

## Resumo

Neste artigo são discutidas as principais causas que podem ter sido responsáveis pelas grandes extinções de espécies observadas nos últimos 600 milhões de anos da história da Terra. Em geral, catástrofes cósmicas e um vulcanismo intenso tem sido as razões invocadas. Hoje, aceita-se que as causas são diversas e complexas. As extinções resultam de uma alteração importante e sobretudo rápida do habitat, como por exemplo o clima, impedindo que as espécies tenham tempo de se adaptar às condições do novo ambiente. Existem indícios preocupantes que estejamos presentemente no limiar de uma nova extinção massiva na qual a espécie humana, responsável por ela, pode sofrer graves consequências.

## Abstract

In this article are discussed the main causes suspected to be responsible for the massive extinction of species during the last 600 million years of the Earth's history. Generally, cosmic catastrophes and volcanism have been invoked as the main reasons. However, in the present days, there is a consensus among experts that these extinction episodes are due to multiple causes, which modify the habitat, in particular the climate, in a short timescale. Consequently, species do not have enough time to adapt themselves to the new environment and disappear. There are indications that we are in the dawn of a new massive extinction that may have severe implications for the surviving of the humanity.

**Palavras-chave:** extinções massivas, mudanças climáticas, vida na Terra

**Keywords:** mass extinctions, climate change, life on Earth

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v6n1.47448](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v6n1.47448)

## 1 Introdução

A vida na Terra passou por várias crises, que correspondem a extinções massivas de espécies causadas por mudanças drásticas nos ecossistemas marinhos e terrestres. Quais os fatores que atuaram de forma significativa para provocar tais alterações abruptas do clima e do meio ambiente? Nestes últimos anos, estudos biopaleontológicos mostraram que as causas das extinções massivas são muito mais complexas do que se poderia supor. É possível que variações do nível oceânico tenham tido um papel preponderante, assim como períodos de resfriamento ou de aquecimento climático similar ao observado presentemente. Este tema é de atualidade pois mais de 1000 espécies desapareceram nos últimos 500 anos, podendo ser o indicio que estamos no limiar de uma nova extinção massiva, na qual a ação humana não pode ser desconsiderada.

A diversidade das diferentes formas de vida

existentes no nosso planeta são um motivo de admiração e mesmo de êxtase para todos nós. Até hoje, cerca de 2 milhões de espécies foram descritas mas, diferentes estimativas indicam que o número total pode se situar entre 5 e 100 milhões. No entanto, aproximadamente 90% das espécies que surgiram e se desenvolveram durante a evolução da Terra foram extintas.

Formas de vida surgem e desaparecem continuamente no decorrer da evolução. Uma extinção massiva se caracteriza por um aumento considerável da taxa de extinção em relação aos valores médios. Representa, numa escala global, o rápido desaparecimento de diferentes tipos de organismos. É importante mencionar que as extinções ocorridas não constituem nem um grupo nem uma série de eventos homogêneos. Mais ainda, durante os últimos 500 milhões de anos (Ma) a diversidade de espécies tem aumentado, uma vez que espécies viventes criam, em geral, um ambiente favorável para outras e, neste caso, as extin-

ções representam apenas uma queda temporária no processo da diversificação. A existência de sobreviventes num evento de extinção não é uma garantia de que os mesmos participarão da diversificação futura. Registros fósseis das espécies que sobreviveram após quatro das cinco grandes extinções, indicam que entre 10 e 20% de tais espécies desapareceram numa escala de tempo da ordem de 1–3 Ma. Desta forma, os efeitos de um evento de extinção podem se estender bem além do evento ele mesmo.

## 2 Caracterizando as extinções

As causas das extinções são diversas e constituem um tema atual de debate entre especialistas de diferentes disciplinas, em particular face as alterações climáticas atuais. Especialistas de áreas afins pensam que estamos presenciando uma nova onda de extinção de espécies, na qual a responsabilidade humana não pode ser descartada. Estima-se que aproximadamente 40 espécies desaparecem por dia e, neste ritmo, em apenas 16 mil anos, 96% do biota atual pode ser extinto. Tais valores são comparáveis aos da Grande Mortalidade, ocorrida há 251 Ma, no fim do período Permiano, como veremos mais adiante. Mais ainda, a duração de certas espécies de aves e mamíferos contemporâneos diminuiu de aproximadamente 10 mil anos, tornando-se cerca de 100 a 1000 vezes inferior que à das formas fossilizadas. Se os ecossistemas continuarem sendo destruídos no ritmo atual, a duração de tais espécies será apenas de 200–400 anos! Algumas das causas repertoriadas pelos cientistas são a pesca descontrolada e feita em escala industrial, a destruição das florestas, a poluição industrial, o aquecimento climático, que altera os habitats naturais e a cadeia alimentar, principalmente nos mares, oceanos e florestas.

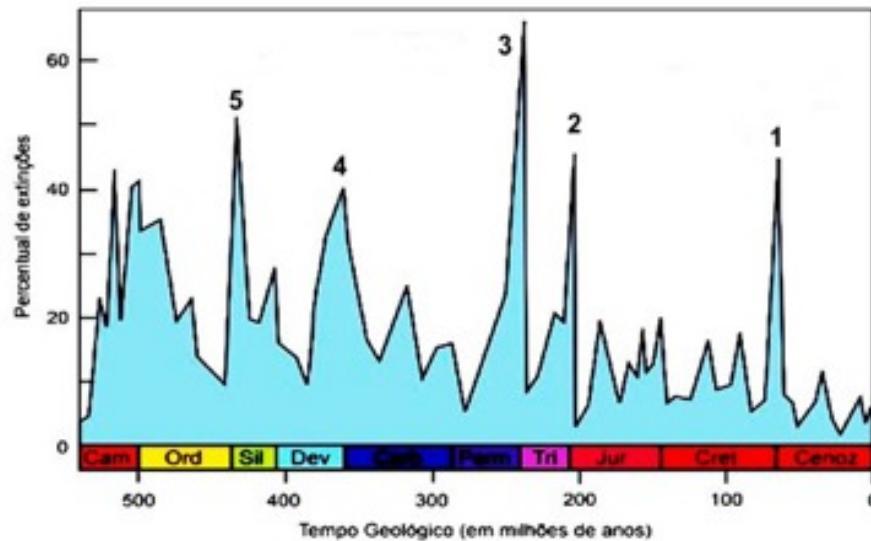
Embora as extinções sejam eventos observados em estudos paleontológicos, a razão (ou razões) precisa pela qual uma dada espécie animal ou vegetal desaparece é difícil de ser estabelecida. Tal dificuldade reside na forma pela qual os paleontologistas estabelecem a existência de uma extinção. Na realidade, estes eventos são determinados pela ausência de fósseis de uma dada espécie em rochas cada vez mais “jovens”. Entretanto, não se pode excluir que a espécie desapareceu numa re-

gião particular mas tenha sobrevivido por muito mais tempo em outras com condições mais favoráveis. Não se pode, da mesma forma, excluir a possibilidade que a espécie tenha evoluído via seleção natural e, neste caso, as alterações morfológicas dificultam uma identificação dos fósseis sem ambiguidade.

As camadas sedimentares da litosfera mostram a existência de dois grandes níveis nos quais se notam mudanças dramáticas na fauna e na flora. Estes níveis serviram para definir as fronteiras entre as três eras: a Paleozoica (vida antiga), iniciada há 545 Ma, a Mesozoica (vida intermediária), que começa há 250 Ma e a era atual, a Cenozoica (vida nova), que se iniciou há 65 Ma. As eras são divididas em períodos, e a fronteira entre eles está geralmente caracterizada por extinções massivas. A era Paleozoica compreende seis períodos, a saber: o Cambriano, o Ordoviciano, o Siluriano, o Devoniano o Carbonífero e o Permiano, enquanto a era Mesozoica está dividida em três períodos, ou seja: o Triássico, o Jurássico e o Cretáceo.

A [Figura 1](#), construída a partir de uma compilação de dados feita por J. J. Sepkoski Jr., ilustra o porcentual de extinção observado em função dos períodos geológicos. O porcentual dado concerne essencialmente invertebrados, assim como diferentes espécies de corais que habitaram os oceanos primitivos. O intervalo de tempo em que se calcula o fator de extinção denomina-se estágio, com uma duração típica de vários milhões de anos.

Cinco grandes extinções podem ser identificadas neste diagrama: a primeira, ocorrida há  $65,5 \pm 0,5$  Ma, marca a transição entre os períodos Cretáceo e a era Cenozoica (daqui por diante, transição C–C). É a mais conhecida, pois nela desapareceram os dinossauros bem como 50% das espécies existentes na época. A segunda ocorreu há  $203 \pm 4$  Ma, marcando a transição entre o Triássico e o Jurássico, quando 53% das espécies marinhas desapareceram. A terceira, também conhecida como a Grande Mortalidade, é a mais importante de todas, marcando a transição entre o Permiano e o Triássico ocorrida há  $251 \pm 1$  Ma e implicando na extinção de 96% de todas as espécies marinhas. Estima-se que 70% das espécies terrestres tenham sido igualmente extintas. A quarta grande extinção culminou no fim do período Devoniano há  $376 \pm 2$  Ma e é constituída



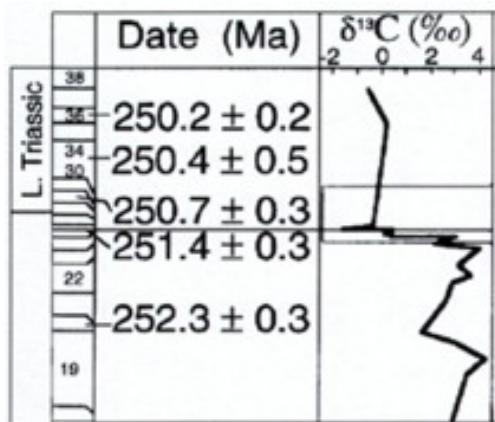
**Figura 1:** Evolução das extinções de espécies ao longo da história da Terra. As cinco grandes extinções estão assinaladas.

por uma série crescente de extinções na quais desapareceram quase 70% das espécies existentes. A quinta grande extinção, ocorrida há  $445 \pm 2$  Ma, marca a transição entre os períodos Ordoviciano e Siluriano e nela desapareceram aproximadamente 75% das espécies marinhas. Nota-se igualmente uma série de extinções estendendo-se ao longo do Cambriano e do Ordoviciano.

Uma outra característica a ser notada na figura 1 é o declínio lento e gradual das extinções nos últimos 550 Ma. Qual a razão (ou razões)? Existem atualmente três hipóteses para explicar tal tendência. A primeira sugere que o efeito não é real, mas sim uma “ilusão”, consequência do fato que paleontologistas estão mais familiarizados com organismos marinhos modernos que passados. Isto significa que há chances que espécies antigas sejam mal classificadas, aumentando-se artificialmente o número de gêneros não vistos atualmente. A segunda, implica que organismos marinhos mudem de ambiente no decorrer da evolução indo, por exemplo, para as bordas continentais. A terceira e mais recente explicação sugere que os mares e oceanos tornaram-se progressivamente mais favoráveis ao desenvolvimento da vida. No passado, a circulação marinha era bastante lenta e pouco ou nenhum oxigênio estava presente nas águas. Como consequência, o plancto era extremamente ineficiente para produzir material orgânico via fotossíntese, necessário para o estabelecimento da cadeia alimentar. Com o movimento das placas tectônicas e o de-

senvolvimento das plantas, os oceanos começaram a receber nutrientes dos continentes varridos pelos rios. O resultado desse processo foi produzir uma diversidade de plancto responsável pelo desencadeamento de diferentes ecossistemas, diminuindo a possibilidade de uma extinção ocorrer. Mais recentemente, estudos isotópicos da baritina ( $\text{BaSO}_4$ ) em rochas provenientes do extremo norte do Canadá, com idades da ordem de 2 bilhões de anos, indicam uma redução drástica da produtividade primária. Em outras palavras, na transformação do  $\text{CO}_2$  atmosférico em compostos orgânicos via fotossíntese. Tal variação sugere uma redução na população de microrganismos como as bactérias cianogênicas, forma de vida dominantes na época.

Deve-se mencionar que, graças a espectroscopia nuclear de massa, é possível se determinar com precisão a razão isotópica  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  nas rochas. Tal razão, em rochas desprovidas de material de origem orgânica é tipicamente 89. Por outro lado, o processamento do  $\text{CO}_2$  pelas plantas enriquece os detritos em  $^{12}\text{C}$ , fazendo com que rochas constituídas por tais sedimentos tenham uma razão isotópica mais elevada, isto é, aproximadamente 92. Desta forma, excursões negativas do  $^{13}\text{C}$  nas camadas sedimentares implicam a presença de material orgânico, indicando com precisão a ocorrência de uma extinção. A [Figura 2](#), adaptada do estudo da transição entre o Permiano e o Triássico por S. A. Bowring e colaboradores, mostra claramente uma variação porcentual



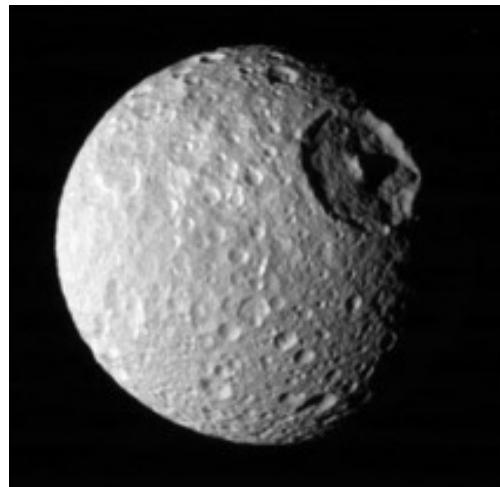
**Figura 2:** Variação da razão isotópica ao longo da transição Permiano-Triássico  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ .

negativa da ordem de 2% do  $^{13}\text{C}$ , indicando a extinção de massa Permiano-Triássico e permitindo sua datação com grande precisão.

### 3 Causas das extinções

Duas grandes teorias foram desenvolvidas para explicar, em particular, a extinção dos dinossauros. A primeira, devida ao físico e prêmio Nobel Luis Alvarez, sugere que a causa maior da extinção Cretáceo-Cenozoico (C-C) foi um impacto com um asteroide de grandes proporções, isto é, com dimensão comparável a da camada atmosférica ( $\sim 10$  km), o que impediria sua desintegração parcial ou total, como ocorre em geral com os pequenos asteroides que impactam a Terra. A segunda, desenvolvida por geólogos e geofísicos como Dewey McLean e Vincent Courtillot entre outros, sugere que uma intensa atividade vulcânica foi responsável não somente pela extinção (C-C) mas também pelas demais.

No entanto, impactos extraterrestres e vulcanismo não são as únicas causas supostas das extinções massivas. Existem evidências que, durante os últimos 500 Ma, houve variações consideráveis do nível dos oceanos. Um abaixamento do nível dos mares reduz a produtividade nas plataformas continentais o suficiente para causar uma extinção das espécies marinhas e, mais ainda, pode introduzir um desequilíbrio nas relações oceano-atmosfera, as quais influenciam o clima global, afetando, por consequência, as espécies terrestres. Estudos recentes mostram que as condições nos oceanos, relacionadas com o ní-



**Figura 3:** O satélite de Saturno, Mimas e sua cratera de impacto Herschel.

vel das águas, podem controlar as taxas de extinção marinha, selecionar os animais e plantas marinhas que sobreviverão ou perecerão, determinando assim as formas de vida oceânica.

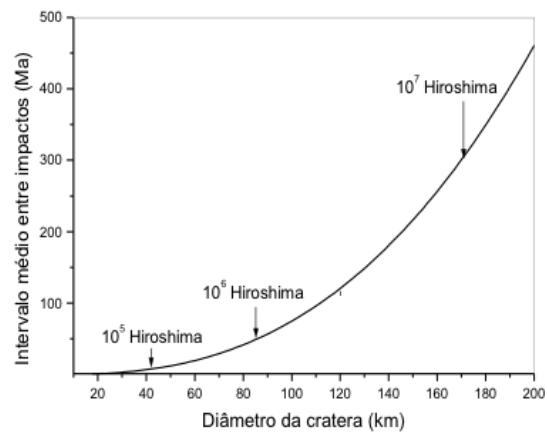
#### 3.1 Impactos cósmicos

A observação de planetas rochosos e luas do sistema solar mostra uma grande abundância de crateras que, na sua grande maioria foram causadas por impactos com asteroides. O estudo do “craterismo” de origem não vulcânica pode nos informar quanto a densidade e a distribuição de dimensões dos pequenos corpos presentes no sistema solar e testar diferentes teorias de formação planetária.

Exemplos típicos de um “craterismo” de impacto são as superfícies da Lua e de Mercúrio. Um outro exemplo interessante é o de Mimas, um pequeno satélite de Saturno, tendo apenas 392 km de diâmetro mas, exibindo em sua superfície uma cratera, denominada Herschel, com um diâmetro da ordem de 130 km ou seja, da ordem de 1/3 da dimensão de Mimas (Figura 3). A cratera se eleva aproximadamente 5 km acima do solo e tem uma profundidade da ordem de 10 km. O impacto que originou Herschel quase destruiu Mimas, produzindo fraturas causadas pelas intensas ondas de choque que resultaram da colisão e que podem ser observadas no lado oposto a cratera. O asteroide responsável por tal impacto deveria ter um diâmetro da ordem de 3,2 km e uma massa de 50 bilhões de toneladas!

Embora a quase totalidade de tais crateras de impacto tenham sido produzidas num passado remoto, existem exemplos de colisões recentes. O mais espetacular refere-se aos impactos dos fragmentos do cometa Shoemaker-Levy 9 com Júpiter em 1994. O núcleo do cometa foi fragmentado por forças de maré durante uma passagem próxima a Júpiter em julho de 1992. Dois anos mais tarde, restos do cometa colidiram sucessivamente com a superfície do planeta, produzindo manchas escu- ras na atmosfera, observadas por um grande número de observatórios terrestres e espaciais, como o telescópio Hubble e a sonda Galileo. Tais impactos representaram uma oportunidade única na história da humanidade de testemunhar eventos catastróficos previstos com antecedência. O impacto mais energético, correspondendo ao fragmento L, ocorreu no dia 19 de julho de 1994 por volta de 22h16m TU (tempo universal). O choque, observado pelo telescópio espacial Hubble, produziu uma enorme “pluma” de gases que se elevou por milhares de km acima do limbo de Júpiter. Paradoxalmente, no solo, apenas dois grupos reportaram observações espectroscópicas do evento: um na França, no Observatório do Pico do Midi (nos Pirineus), liderado por M. Roos-Serote e outro no Brasil, no Observatório do Pico dos Dias (MG), do qual faziam parte Roberto D. Costa, Patan Singh, Amaury de Almeida, da Universidade de São Paulo, Said Codina, do Observatório Nacional e o autor deste artigo. No material da “pluma”, provavelmente constituído de gases atmosféricos jovianos (na quase totalidade) e do cometa, pode-se detectar a presença de elementos como o sódio, o ferro, o cálcio e o lítio. O grupo brasileiro estimou, com base em suas observações, que a razão de abundâncias na “pluma” entre o lítio e o sódio é 12/1000, isto é, doze átomos de lítio para cada 1000 átomos de sódio. Tal valor é compatível com os valores encontrados em meteoritos, sugerindo que a composição do material da “pluma”, seja ele joviano ou cometário, reflete provavelmente a abundância da nebulosa que deu origem ao sistema solar.

E no caso da Terra? Estimativas baseadas no número (incerto) de asteroides presentes no sistema solar indicam que a Terra deve sofrer um impacto a cada 40 000 anos com um asteroide de 200 m de diâmetro, o que causaria uma cratera de aproximadamente 5,6 km de diâmetro. Impac-



**Figura 4:** Intervalo médio (em Ma) entre impactos que produzem crateras com dimensões quilométricas. Um impacto com energia equivalente a 10 milhões de vezes a explosão de Hiroshima ocorre uma vez em cada 300 Ma.

tos catastróficos, produzidos por asteroides de dimensões quilométricas, são mais raros e o intervalo de tempo esperado entre colisões de tal natureza é da ordem de algumas centenas de milhões de anos. A [Figura 4](#) mostra o tempo médio estimado entre impactos que produzem crateras com dimensões similares. Também estão indicadas na figura as dimensões correspondendo a impactos equivalentes a  $10^5$ ,  $10^6$  e  $10^7$  vezes a bomba atômica que destruiu a cidade de Hiroshima.

A evidência de um impacto ocorrido há 65 Ma, coincidente com a extinção ocorrida no fim do Cretáceo, foi apresentada pela primeira vez pelo geofísico Walter Alvarez, filho de Luís Alvarez e seus colaboradores. Os químicos Frank Asaro e Helen Michels, colaboradores de Alvarez, mostraram que a argila situada na transição em questão possuía uma abundância importante do metal irídio. O irídio foi identificado em inúmeros locais do globo, constituindo uma “fina” camada sedimentar, indicando que foi depositado numa curta escala de tempo. Como tal elemento é extremamente raro (na Terra, em média, encontramos 1 átomo de irídio para cada 1 250 000 átomos de silício) e como a abundância encontrada é comparável à dos meteoritos, a equipe de Alvarez sugeriu que o irídio se depositou numa escala global como consequência das “nuvens de poeira” formadas durante o impacto e transportadas pela circulação atmosférica, de forma similar às cinzas de grandes erupções vulcânicas.

Restos de impactos cósmicos remotos são di-

**Tabela 1:** Crateras de impacto produzidas por asteroïdes com dimensões quilométricas.

cratera	localização	idade (Ma)	diâmetro (km)	diâmetro do asteroïde (km)	Notas
Agraman <sup>a</sup>	Australia	~590	90	4,4	-
Álamo <sup>c</sup>	EUA	~367	45-65	2,0-3,0	-
Araquainha <sup>a</sup>	Brasil	244±3	40	1,8	-
Beaverhead <sup>a</sup>	EUA	~600	60	2,8	-
Charlevoix <sup>b</sup>	Canadá	357±15	54	2,5	-
Chesapeake Bay <sup>c</sup>	EUA	35,5±0,3	90	4,4	-
Chicxulub <sup>c</sup>	México	65±1	~200	10,8	1
Kara <sup>c</sup>	Rússia	70±2	65	3,0	-
Manicouagan <sup>b</sup>	Canadá	214±1	100	5,0	-
Morokweng <sup>c</sup>	África do Sul	145±1	70	3,3	-
Popigai <sup>b</sup>	Rússia	36±1	100	5,0	-
Puchezh-Katunshi <sup>c</sup>	Rússia	220±10	80	3,9	-
Siljan <sup>b</sup>	Suécia	377±2	52	2,4	2
Tookoonooka <sup>c</sup>	Australia	128±5	55	2,6	-
Woolleigh <sup>c</sup>	Australia	364±8	40	1,8	-

**Observações:** *a* = cratera exposta; *b* = cratera semi-soterrada; *c* = cratera soterrada.

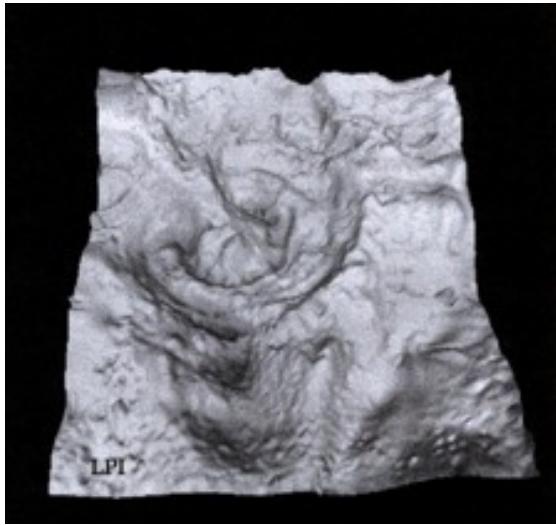
**Notas:** 1) impacto associado à extinção dos dinossauros; 2) impacto talvez associado aos eventos no fim do Devoniano. Dimensões dos asteroïdes – calculadas admitindo-se um impacto em rochas cristalinas e um asteroïde “rochoso” (densidade de  $3.0 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ).

fíceis de serem detectados devido aos efeitos da erosão e da evolução natural da crosta terrestre. Mesmo assim existe um número considerável de estruturas geológicas atribuídas a impactos com asteroïdes e/ou cometas. Dois dos maiores impactos já registrados ocorreram respectivamente em Vredefort (África do Sul) e em Sudbury (Canadá). O primeiro há cerca de 2,0 bilhões de anos e o segundo há aproximadamente 1,8 bilhões de anos, produzindo respectivamente crateras com cerca de 300 km e 250 km de diâmetro. A [Tabela 1](#) lista algumas destas estruturas, indicando a localização, dimensões, idade estimada do impacto e as características calculadas do asteroïde responsável pelas mesmas. Deve-se mencionar que o Brasil possui uma importante cratera, em Araquainha, com 40 km de diâmetro, produzida por um impacto ocorrido há 244 Ma.

Para depositar a quantidade de irídio observada, estimou-se que o asteroïde responsável pelo impacto deveria ter aproximadamente 10 km de diâmetro e uma massa de 1 trilhão de toneladas. Simulações do impacto feitas em computador indicam que o asteroïde não sofreria qualquer

desgaste pela atmosfera e produziria uma cratera da ordem de 150–200 km de diâmetro. Uma cratera de forma ovalada, denominada Chicxulub [Figura 5](#), foi encontrada na península de Yucatan (México) por Tony Camargo, um geofísico trabalhando para a companhia petrolífera mexicana PEMEX. O diâmetro, de aproximadamente 180 km, é consistente com as previsões teóricas. A forma ovalada pode ser facilmente explicada se o ângulo de impacto se situar entre  $20^\circ$ – $30^\circ$ , privilegiando a direção norte no espalhamento dos restos da explosão que se sucedeu. Rochas ígneas na vizinhança da cratera, todas com uma idade da ordem de 65 Ma, possuem inúmeras peculiaridades e, em particular, altos níveis de irídio.

Se tais evidências parecem ser concludentes, existem ainda testemunhos geológicos adicionais. Sabemos que, como consequência do impacto de meteoritos, formam-se estruturas de quartzo comprimido, isto é, que sofreu efeitos de uma forte e súbita compressão, provavelmente por uma onda de choque. Se o quartzo não se fundir, apresenta microestruturas em camadas que são uma assinatura inconfundível de sua origem.



**Figura 5:** A cratera Chicxulub, associada ao impacto ocorrido há 65 Ma, na transição entre o Cretáceo e o Terciário, encontra-se soterrada na península do Yucatan. A imagem acima foi construída com base em dados de variações gravimétricas e magnéticas.

Formam-se ainda pequenas esferas vitrificadas, consequência da fusão da rocha que sofreu o impacto e que são dispersas pelo sopro da explosão. Em vastas regiões ao norte do Yucatán, como esperado face ao ângulo de impacto, a transição C–C contém, igualmente, tais esferas vitrificadas e quartzo comprimido.

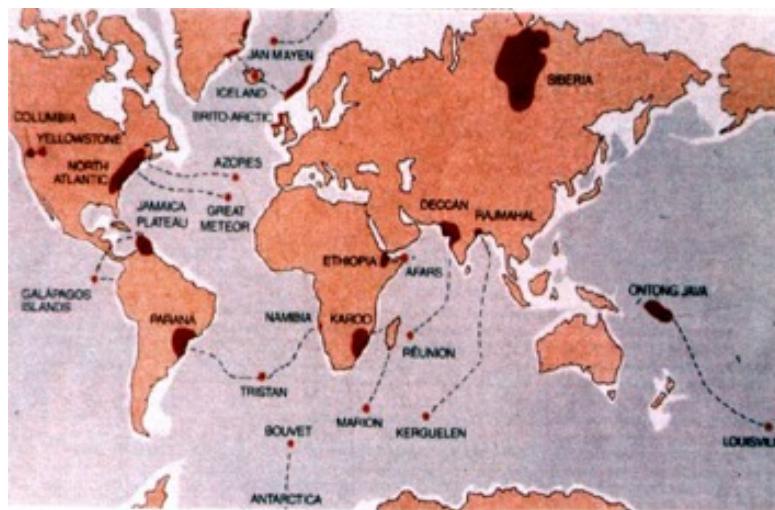
Existem outras evidências de impactos associados a eventos de extinção? Há alguns anos atrás, o geólogo John Gorter, estudando os perfis sísmicos de uma região situada na costa noroeste da Austrália, mostrou a existência de uma cratera soterrada, com um diâmetro aproximado de 200 km, denominada Bedout. Estudos posteriores, publicados em 2004 por uma equipe liderada por L. Becker, indicaram, com grande precisão, que a idade de Bedout é  $250,1 \pm 4,5$  Ma. Segundo a equipe de Becker, Bedout é uma cratera de impacto e sua idade coincide com a extinção P–Tr ou a Grande Mortalidade. Neste caso, teríamos um outro exemplo de uma grande extinção associada a um impacto cósmico. No entanto, um grande número de especialistas, entre eles Paul Wignall, Bruce Thomas e Andrew Glikson, contestam a interpretação de um impacto como origem da cratera, acreditando ser a mesma de origem vulcânica e, portanto, nada tendo a ver com a extinção P–Tr. Resta ainda uma segunda possibilidade. R. Schmidt em 1962 e J. G. Weihup em

1976, baseando-se no estudo de anomalias gravimétricas na região de Wilkes Land, no continente Antártico, propuseram a existência de uma gigantesca cratera de impacto no local, situada abaixo da camada permanente de gelo. Observações gravimétricas espaciais feitas pelo satélite GRACE e imagens radar, obtidas igualmente do espaço, são consistentes com uma tal interpretação. A cratera tem um diâmetro estimado de 480 km e, se sua suposta origem for confirmada por estudos futuros, representaria o vestígio de um dos maiores impactos já sofridos pela Terra, superior inclusive ao de Vredefort. Sua idade é bastante incerta mas estimada em cerca de 250 Ma, o que nos levaria a uma associação com a extinção P–Tr. Finalmente, um outro caso suspeito refere-se ao impacto que produziu a cratera Siljan, na Suécia há 377 Ma, que poderia estar associado aos eventos de extinção que ocorreram no fim do Devoniano.

No Cenozoico ocorreram impactos de relativa importância. A cratera Ries, na Alemanha, foi produzida por um impacto há cerca de 15 Ma, lançando restos da colisão através da Suíça e da República Tcheca. Como enfatizado por Richard Cohen, tal evento sequer afetou a fauna local! Outros grandes impactos, como os que ocorreram respectivamente há 50 Ma, que formou no Atlântico Norte (Nova Escócia) a cratera Montagnais de 45 km de diâmetro e há 35 Ma, que impactou a baía de Chesapeake, formando uma cratera de 90 km, não causaram igualmente nenhuma extinção. Isto poderia indicar que, impactos associados a crateras com diâmetros inferiores a  $\sim 150$  km ou ocorrendo isoladamente, não são capazes de produzir extinções a um nível planetário.

### 3.2 O Vulcanismo terrestre e o clima

Como já mencionado, diferentes pesquisadores pensam que as extinções de espécies ocorridas no passado são devidas a uma intensa atividade vulcânica e não devidas a impactos cósmicos. Erupções vulcânicas produzem uma grande quantidade de cinzas que podem causar um resfriamento do clima mas, igualmente, aerossóis ricos em óxidos de enxofre, que permanecem em suspensão na atmosfera por longos períodos, afetando as condições climáticas e produzindo, em



**Figura 6:** Mapa indicando os grandes derramamentos de lava ocorridos nos últimos 300 Ma bem como a posição atual dos “pontos quentes” responsáveis pela extrusão da lava.

particular, chuvas ácidas. A erupção do Tambora (Indonésia), em 1815, ejetou na atmosfera entre 100 e 150 km<sup>3</sup> de cinzas e partículas. A quantidade de cinzas que circulou na alta atmosfera foi capaz de bloquear uma fração não desprezível da radiação solar para produzir o chamado “ano sem verão” de 1816. As colheitas foram afetadas, produzindo a fome em diversas regiões da Terra. Mais recentemente, podemos mencionar a erupção do Pinatubo, vulcão situado ao noroeste de Manilha, na ilha de Luzon. Após permanecer adormecido por quase 500 anos, o vulcão voltou a se manifestar em abril de 1991, atingindo o máximo de atividade no dia 15 de junho do mesmo ano. Estima-se em aproximadamente 25 km<sup>3</sup> o volume de material ejetado na atmosfera, assim como em 20 milhões de toneladas a quantidade de SO<sub>2</sub> ejetada que, em 22 dias já cobria toda zona equatorial terrestre. A ejeção de aerossóis pelo Pinatubo foi a mais importante ocorrida desde a erupção do Krakatoa em 1883, quando cerca de 17 milhões de toneladas de SO<sub>2</sub> foram lançadas na atmosfera. A presença desta molécula foi detectada na atmosfera pelo satélite ERBS dezoito meses após a erupção. Como consequência, observou-se um resfriamento em escala mundial, com uma diminuição média da temperatura da ordem de 0,5 °C. O tempo chuvoso em 1992 nos Estados Unidos é, em parte, atribuído ao aumento de poeira e aerossóis na atmosfera, que agiram como sementes de condensação nas nuvens.

No período Triássico os continentes atuais ainda não existiam. Havia um único supercontinente, denominado Pangeia e um superoceano, o Panthalassa. Tal extensão de terras produziu um clima interior extremamente seco, com grandes variações nas regiões costeiras, segundo as estações. No geral, desertos dominavam o interior do continente e bolsões com florestas temperadas ou tropicais existiam nas zonas costeiras. No período Jurássico, devido à atividade tectônica, o supercontinente Pangeia fraturou-se em dois: a Laurásia ao norte e o Gondwana ao sul. Florestas equatoriais começaram a substituir os desertos em ambos os continentes. No fim do Cretáceo, os dois continentes sofreram separações adicionais e a distribuição das terras era praticamente a atual. Neste momento ocorreram importantes variações climáticas que, certamente, afetaram a sobrevivência de inúmeras espécies.

Durante tais períodos de modelagem da superfície terrestre ocorreram vários episódios de intensa atividade vulcânica, em particular na região de Deccan, na Índia. Ali encontramos uma imensa estrutura em forma de escada, formada por sucessivos derramamentos de lava, que se estende por uma superfície de cerca de 500 000 km<sup>2</sup>, representando um volume pouco superior a 2–3 milhões de km<sup>3</sup>. É quase certo que tais números subestimem os valores reais, pois a erosão deve ter reduzido de forma apreciável a área e o volume originais. A formação das escadas de Deccan é explicada da seguinte maneira: No fim do

Cretáceo, a Índia era uma massa de terra isolada, derivando na direção do norte e prestes a colidir com a Ásia. Quando a Índia se situava a leste de Madagascar e pouco abaixo da linha equatorial, passou sobre um “ponto quente” ou seja uma pluma do manto, que é simplesmente uma coluna de lava presente no manto terrestre e que emerge na litosfera como um vulcão. Vulcões considerados como pontos quentes liberam quantidades importantes de lava basáltica na superfície que, por sua grande fluidez, espalha-se por grandes áreas.

As escadas de Deccan constituem um dos maiores derramamentos de lava da história geológica da Terra. O derramamento iniciou-se alguns milhões de anos antes da transição C–C, mas estima-se que 90% da lava foi liberada naquele momento. Geofísicos franceses e indianos identificaram recentemente uma camada de 600 m de espessura que se formou em apenas 30 000 anos, correspondendo a um fluxo médio de lava da ordem de  $10 \text{ km}^3/\text{ano}$ . Na formação de tal camada, estima-se que possa ter sido liberada uma grande quantidade de  $\text{SO}_2$  capaz de produzir alterações climáticas consideráveis se, por exemplo, guardarmos as proporções observadas na erupção atual (desde 1983) do Kilauea (Havai), isto é, um fluxo médio de lava da ordem de  $0,13 \text{ km}^3/\text{ano}$  e uma taxa de emissão de  $\text{SO}_2$  da ordem de  $5,5 \times 10^5 \text{ toneladas/ano}$ . O ponto quente que produziu as escadas de Deccan situa-se hoje na ilha da Reunião. Conhecido como Piton de la Fournaise, é um dos vulcões mais ativos da Terra, contando mais de 100 erupções nos últimos 300 anos.

Um outro aspecto importante da teoria do vulcanismo refere-se ao fato de que a extinção C–C não é a única associada com um grande derramamento de lava. A Grande Mortalidade ou extinção P–Tr, ocorrida há 251 Ma, está também associada a um grande derramamento de lava ocorrido na Sibéria, representando um volume de lava da ordem de 2,5 milhões de  $\text{km}^3$ , comparável ao das escadas de Deccan. A razão isotópica  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  indica que o basalto foi expelido há cerca de  $249,4 \pm 0,5 \text{ Ma}$ , consistente com a idade da transição P–Tr. Ao longo da transição Triássico–Jurássico (203 Ma), durante a formação do Oceano Atlântico, ocorreu um novo e importante derramamento de lava (Central Atlantic Magmatic Province ou CAMP), que se espalhou por uma superfície com um pouco mais de 7 milhões de  $\text{km}^2$ . Tal

derramamento de lava suspeita-se estar associado à extinção Tr–J.

#### 4 Como as catástrofes matam?

A ideia original de Alvarez consistia no aparecimento de um clima invernal após o impacto, análogo ao “inverno nuclear” que resultaria de um conflito nuclear global. O impacto de um asteroide com 10 km de diâmetro pode vaporizar uma massa considerável de rochas e dispersá-la na atmosfera, formando uma cobertura de poeira que filtraria a luz solar durante meses. Para uma redução global de  $5^\circ\text{C}$  na temperatura média da Terra, uma massa da ordem de 170 milhões de toneladas de grãos de poeira com dimensões da ordem de  $5 \mu\text{m}$  seria necessária. Nestas condições, o reino vegetal seria fortemente atingido pois a fotossíntese não mais se realizaria em condições ideais tanto em terra como nos oceanos, através das algas e do plancto. Um outro cenário possível é o seguinte: as rochas na região de Chicxulub são ricas em enxofre e o impacto poderia produzir uma quantidade apreciável de aerossóis ricos em sulfatos. Uma vez presentes na atmosfera, tais aerossóis agiriam como sementes de nucleação de chuvas ácidas, devastadoras para a vegetação. Mais ainda, animais que respiram seriam sufocados e as conchas protetoras de animais marinhos vivendo próximo das praias seriam dissolvidas, com consequências previsíveis. É um tal cenário compatível com dados paleontológicos?

Os registros fósseis indicam algumas tendências que devem ser explicadas por qualquer teoria de extinção massiva. Em geral, o processo de extinção afeta seres marinhos e terrestres sem exceção. O processo se inicia com a destruição de formas de vida tropical e subtropical e continua com formas menos especializadas. Na terra, as plantas resistem melhor que os animais. A seletividade do processo é uma indicação para entendermos “o” ou “os” mecanismos de destruição. Na extinção P–Tr (a Grande Mortalidade) animais com esqueletos massivos e carbonatados foram consideravelmente mais destruídos do que os animais com pouco ou nenhum carbonato no esqueleto. A compreensão do porquê certas espécies sobreviveram é, talvez, uma das chaves para entendermos os mecanismos que fizeram as outras perecerem.

rem. Por outro lado, na extinção C–C, animais consumidores diretos de produtos fotossintéticos foram destruídos preferencialmente. Mais ainda, a sobrevivência das aves após este evento é um enigma difícil de ser resolvido. Aves são animais com taxas metabólicas elevadas, com pequenas reservas de energia e que procuram alimentos utilizando a visão. Nestas condições, o “inverno” resultante seja de um impacto ou de vulcanismo, deveria produzir um alto índice de mortalidade, não observado. Fósseis de seres marinhos como os foraminífera (animais microscópicos como as conchas), flagelados e de formas terrestres como o pólen, indicam uma escala de tempo relativamente curta (alguns milhares de anos) para a extinção C–C. No entanto, novos dados paleontológicos e paleoclimáticos indicam que a extinção C–C foi mais progressiva do que abrupta, começando 0,5 Ma antes da transição. A extinção começou num momento de resfriamento global, o qual terminou por um evento de aquecimento cerca de 0,2–0,4 Ma antes da transição e que pode ter sido desencadeado pela extrusão de lava que deu origem às escadas de Deccan. Ao curto pulso de aquecimento seguiu-se um novo resfriamento (2–3 °C) que durou aproximadamente 0,1 Ma. A extinção acelerou-se nesta fase final de resfriamento, atingindo o máximo na transição. Mais ainda, medidas isotópicas da razão nas vizinhanças da transição C–C, indicam importantes flutuações na produtividade oceânica nos 3 milhões de anos antecedendo a extinção final. A produtividade oceânica caiu a níveis baixíssimos e a circulação termohalina praticamente desapareceu por alguns milhares de anos após a transição. O ecossistema marinho foi restabelecido somente 2–3 milhões de anos após o evento. Por outro lado, dados geocronológicos recentes do derramamento de lava CAMP, ocorrido no fim do Triássico, indicam que a duração do episódio foi da ordem de 40 000 anos. A resultante concentração de aerosóis sulfatados na atmosfera aumentou o albedo terrestre, causando um inverno nuclear, responsável pelo desaparecimento de uma fração considerável da flora e da fauna continentais.

O cenário descrevendo a Grande Mortalidade começa ficar mais explícito. Segundo Robert Berner, da Universidade de Yale, no período Carbonífero o conteúdo de oxigênio na atmosfera era 43% maior que o atual. No fim do Permiano e

parte do Triássico, o nível caiu para valores correspondentes a cerca de 60 % do atual. Isto se deve provavelmente ao clima árido da época e a extrusão de lavas na Sibéria, que destruiu o equilíbrio do ciclo do carbono, aumentando a quantidade de CO<sub>2</sub> e diminuindo a de O<sub>2</sub> na atmosfera. Isto é confirmado pelo estudo da razão isotópica <sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C feito por Peter Ward, da Universidade de Wisconsin, em rochas da transição P–Tr e pelo estudo da extinção de briozoários (animais similares aos corais) durante o fim do Permiano, por Catherine Powers e David Bottjer. Eles mostraram que, efetivamente, a taxa de extinção dos briozoários acompanha o aumento de CO<sub>2</sub> nos oceanos. Como consequência, os ecossistemas terrestres ficaram sob forte tensão e animais com alto metabolismo desapareceram. O aumento da temperatura (~6 °C) diminuiu a solubilidade do oxigênio nas águas oceânicas, causando a extinção de animais que constituem a base da cadeia alimentar, tal como se observa atualmente no mar Mediterrâneo e no Mar do Norte. Mais ainda, um baixo teor de oxigênio nos mares favorece o desenvolvimento de bactérias anaeróbicas, capazes de produzir sulfeto de hidrogênio (H<sub>2</sub>S), responsável pela destruição da vida marinha em diferentes níveis de profundidade. Tal situação é similar à observada hoje no Mar Negro. Indícios paleontológicos da presença de bactérias que produzem H<sub>2</sub>S em sedimentos datando do fim do Permiano foram encontrados, dando um suporte adicional ao cenário em questão.

## 5 Múltiplas causas

Existe hoje um consenso entre especialistas que as extinções massivas representam um conjunto de fatores que colocam sob tensão diferentes ecossistemas em escalas de tempo muito curtas, impedindo uma adaptação ao novo ambiente.

Assim, na extinção C–C, os principais fatores que influenciaram o desaparecimento de inúmeras formas de vida foram: 1) o grande derramamento de lava que produziu as estruturas do Deccan e que injetou uma grande quantidade de CO<sub>2</sub> e de SO<sub>2</sub> na atmosfera, causando um aquecimento global e chuvas ácidas antes do impacto do asteroide; 2) impacto de um asteroide (cratera Chicxulub), que ocasionou incêndios em escala global e um in-

verno nuclear, causa do colapso de ecossistemas responsáveis pela fotossíntese e da cadeia primária alimentar; 3) variações adicionais do nível dos oceanos durante o Cretáceo aumentaram a tensão existente nos ecossistemas, reduzindo o habitat de inúmeras espécies.

A cronologia dos fatos que antecederam e sucederam a transição C–C sugere fortemente que o impacto do Yucatán não foi a causa maior da extinção. Trabalhos recentes mostram a presença de múltiplos picos de irídio na transição C–C. Isto significa que: ou ocorreram múltiplos impactos, como pretende o geólogo suíço Thierry Adatte, hipótese pouco provável, ou que o irídio não teve origem no impacto que produziu Chicxulub. Neste caso, não podemos excluir uma origem vulcânica, isto é, pela extrusão de lava que deu origem às escadas de Deccan, uma vez que o ponto quente, fonte da lava, o Piton de la Fournaise, produz ainda hoje, em suas erupções, material contendo irídio.

No caso da extinção entre o Triássico e o Jurássico, a causa maior invocada, como discutido acima, é a atividade vulcânica associada ao CAMP, envolvendo a ruptura do supercontinente Pangeia. Tal atividade injetou uma grande quantidade de gases de efeito estufa, causando um rápido aquecimento global e uma acidificação importante dos oceanos. Um aumento da temperatura oceânica produz uma importante anoxia e um colapso da vida marinha. Embora existam fortes suspeitas da ocorrência de impactos cósmicos, não teriam sido a causa principal da extinção.

A Grande Mortalidade, principal extinção massiva ocorrida na Terra, foi provavelmente ocasionada pela intensa atividade vulcânica ocorrida na Sibéria, que injetou grandes quantidades de gases de efeito estufa na atmosfera, causando um severo aquecimento global, intensas chuvas ácidas e anoxia dos oceanos. Há fortes suspeitas, como visto anteriormente, que um impacto cósmico de grandes proporções possa também estar associado a esta extinção.

Por outro lado, a extinção ocorrida no Devoniano tardio é um exemplo onde os ecossistemas foram submetidos a uma forte tensão por razões diversas. Neste período houve uma grande expansão da vegetação na superfície do planeta e as raízes desestabilizaram o solo, alterando o fluxo de nutrientes aos oceanos, bem como produzindo

uma anoxia dos mesmos e uma ruptura da cadeia alimentar primária. Uma série de fases de resfriamento ocorreram, provavelmente causada por variações do conteúdo do CO<sub>2</sub> atmosférico correlacionado à expansão dos vegetais. Embora ainda em debate, a possibilidade que um impacto cósmico tenha contribuído às alterações do ambiente não pode ser excluída completamente.

Finalmente, a transição entre o Ordoviciano e o Siluriano onde desapareceram cerca de 75% das espécies marinhas, está caracterizada por período de glaciação e mudanças no nível dos oceanos. Uma camada de gelo cobriu o supercontinente do Gondwana causando uma queda abrupta do nível oceânico e uma perda dos habitats marinhos, que concentravam na época a maior parte das formas de vida presentes na Terra. Tal queda na temperatura global se deve provavelmente a uma atividade vulcânica reduzida, responsável por um enfraquecimento do efeito estufa. Mais recentemente, o geólogo Shanan Peters, da Universidade de Wisconsin-Madison, mostrou de forma convincente o que já se suspeitava depois de várias décadas: a variação do nível dos oceanos, consequência da deriva das placas tectônicas e de alterações climáticas, está fortemente correlacionada com grandes extinções. O estudo de Peters mostra que os diferentes grupos de animais marinhos tem preferência por um habitat particular. Assim, animais paleozoicos como corais e braquiópodes, preferem um fundo marinho rico em rochas calcáreas enquanto animais cenozoicos como peixes e crustáceos preferem um fundo arenoso. As alterações do nível oceânico mudam o fundo marinho, destruindo o habitat de um ou de outro tipo de animal. Peters encontrou uma forte correlação entre a taxa de extinção e as propriedades físicas do fundo marinho. Assim, existem atualmente fortes indícios que as extinções ocorridas no fim do Ordoviciano e no fim do Devoniano estão relacionadas com quedas do nível dos mares, causadas por uma intensa glaciação.

## 6 Considerações finais

Na história da Terra, o frágil equilíbrio dos ecossistemas foi quebrado inúmeras vezes por variações climáticas extremas e eventos catastróficos de origem cósmica, que produziram extinções

massivas e reformataram a vida em nosso planeta. Tais extinções marcaram o fim de períodos geológicos e abriram o caminho para novas formas de vida.

As extinções massivas estão, certamente, entre os acontecimentos mais enigmáticos da história de nosso planeta e os novos resultados científicos acima mencionados corroboram a complexidade dos processos que levam a destruição de ecossistemas numa escala global. Não existe uma causa única. A superposição de diferentes processos com diferentes níveis de significância contribuem para produzir uma extinção massiva de espécies. Existe, atualmente, um consenso que, extinções massivas ocorrem quando as condições do ambiente sofrem alterações muito rápidas, sem que as espécies presentes em diferentes ecossistemas tenham tempo de se adaptarem.

O clima passado terrestre sofreu forte influência devido à deriva dos continentes bem como à atividade vulcânica. Tais fatores operam em escala de milhares e/ou de milhões de anos, causando alterações significantes no ambiente. A prolongada atividade vulcânica durante o Período Permiano, como mencionado anteriormente, produziu uma quantidade importante de gases que contribuem ao efeito estufa, causando um aumento da temperatura global. Ao contrário, a extinção que marca a transição entre o Ordoviciano e o Siluriano foi provavelmente causada por um resfriamento global e uma consequente queda do nível dos oceanos, o que levou ao colapso dos habitats marinhos e uma perda aproximada de 85% das espécies existentes.

Diferentes eventos cósmicos associados ou não a variações climáticas também contribuíram para as extinções massivas observadas no passado da Terra. Além do impacto cósmico ocorrido há 65 Ma, suspeita-se que erupções de raios-gama ou de supernovas próximas possam ter destruído temporariamente a camada de ozônio, expondo a vida na superfície a níveis letais de radiação UV.

As extinções massivas ocorridas no passado de nosso planeta possuem denominadores comuns: 1) variações climáticas rápidas levando a um aquecimento ou resfriamento global, que deixam os ecossistemas sob tensão e sem tempo de adaptação; 2) vulcanismo intenso responsável por alterações da composição química da atmosfera e do efeito de serra; 3) consequente alteração das

condições físico-químicas dos oceanos como a acidificação e a anoxia, que destroem formas de vida marinha; 4) impactos cósmicos, hoje considerados não mais como causa primária mas sim agindo como catalisadores ou amplificadores de ecossistemas sob tensão.

O relatório do Painel Intergovernamental de Mudança Climática indica que, até 30% das espécies poderão desaparecer, se a temperatura média global aumentar de 2 °C nas próximas décadas, acima dos valores registrados em 1990. Se a destruição dos ecossistemas continuar no ritmo atual seremos, talvez, o exemplo singular de uma espécie que contribuiu para o desencadeamento de uma nova extinção massiva, que poderá levar a sua própria destruição!

### Sobre o autor

José Antônio de Freitas Pacheco ([pacheco@oca.eu](mailto:pacheco@oca.eu)) é Professor Emérito do Observatoire de la Côte d'Azur (OCA), na França. Formado na Universidade de São Paulo (USP), foi diretor do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da USP, do Observatório Nacional, e do próprio OCA. Membro da Academia Brasileira de Ciências, foi agraciado com a medalha do Mérito Científico do Governo Brasileiro. Possui mais de 200 artigos científicos publicados, tendo sido orientador de mais de 20 doutorandos, tanto no Brasil quanto na Europa. Autor do livro *Vida no Universo*, publicado pela EDUSP.

### Referências

- [1] A. Hallam, *Phanerozoic Sea-Level Changes* (Columbia University Press, New York, 1992).
- [2] R. Cowen, *The History of Life* (Blackwell Science, 1999).
- [3] D. R. Prothero e R. H. Dott Jr., *Evolution of Earth* (McGraw Hill, New York, 2002).
- [4] P. Skelton, *The Cretaceous World* (Cambridge University Press, New York, 2003).
- [5] J. A. F. Pacheco, *O fim dos dinossauros*, Ciência Hoje **43**, 20 (2008).