

PAULO CÉSAR BOGGIANI

Teria estado o planeta Terra totalmente coberto por gelo centenas de milhões de anos atrás?

PAULO CÉSAR BOGGIANI é professor do Departamento de Geologia Sedimentar e Ambiental e coordenador do Curso de Licenciatura em Geociências e Educação Ambiental do Instituto de Geociências da USP.

Paralelo aos debates a respeito do aquecimento global, consequência do efeito estufa, outra intrigante hipótese científica vem sendo debatida no âmbito das geociências, denominada *Snowball Earth*, na qual se discute a possibilidade de o planeta Terra ter estado totalmente coberto por gelo.

Evidências de que o planeta Terra tenha estado, em diversos intervalos de tempo no passado geológico, sob temperaturas mais frias do que as atuais já foram amplamente pesquisadas e comprovadas. De especial interesse para o ser humano foram as glaciações quaternárias, mais conhecidas como “idades do gelo”, as quais ocorreram de forma cíclica, alternando períodos mais frios com períodos relativamente mais aquecidos, nos últimos milhares de anos.

A hipótese *Snowball Earth* não trata dessas glaciações relativamente recentes no tempo geológico e sim de glaciações mais antigas, do Pré-Cambriano, que teriam ocorrido há mais de 540 milhões de anos, quando o planeta Terra era muito diferente se comparado ao que conhecemos atualmente. No Pré-Cambriano, não havia florestas, e a vida, restrita a formas primitivas e microbianas, era presente apenas nos mares, como demonstra o registro fóssilífero. O calor do Sol que incidia na Terra era também menor, consequência da menor energia em seu processo de evolução estelar.

Hipóteses científicas em geociências, como a do *Snowball Earth*, são formuladas a partir da observação do registro geológico e paleontológico, ou seja, os cientistas buscam nas rochas e nos fósseis informações para interpretar como foi a evolução do planeta Terra e, assim, procurar entender como será o futuro.

Estudos das sucessões pré-cambrianas demonstraram, décadas atrás, uma curiosa relação de rochas sedimentares. Em várias localidades do globo terrestre, foram encontradas rochas possivelmente originadas a partir da sedimentação em ambientes com geleiras — chamadas

de tilitos quando a evidência de ação de gelo é comprovada – cobertas por rochas carbonáticas (calcários e dolomitos).

O que intrigava os geocientistas é que, por comparação com o que ocorre atualmente no planeta, as rochas carbonáticas são típicas rochas sedimentares depositadas em águas quentes, como as encontradas na faixa do Equador, associadas à formação de sedimento calcário pela atividade de algas. O problema consistia em explicar a presença dos tilitos, que indicariam ambientes de geleiras, cobertas por rochas que teriam sido depositadas em águas relativamente mais quentes. Seria esse curioso registro sedimentar pré-cambriano indicação de brusca mudança climática global?

Outra questão intrigante é que o registro paleontológico demonstra que o surgimento dos animais ocorreu somente muito tempo depois da origem do planeta. O planeta Terra teria se originado há 4,6 bilhões de anos e os fósseis de animais mais antigos são encontrados em camadas de rochas com idades por volta de 590 milhões de anos. Antes disso, apenas são encontrados fósseis de seres microscópicos primitivos, na forma de bactérias e cianobactérias. Esse registro permite-nos interpretar que a vida na Terra teria estado, por quase 4 bilhões de anos, restrita à atividade microbiana.

Outro registro interessante é que, em algumas rochas do intervalo de tempo entre 590 e 540 milhões de anos atrás, são encontradas inúmeras formas fósseis de animais sem esqueleto, que teriam corpos constituídos por massas de consistência mole, gelatinosa, conhecidos como representantes da fauna de Ediacara. Essa fauna é interpretada como a primeira tentativa de ocupação do planeta por animais, mas teria permanecido por apenas 50 milhões de anos, e entrado em extinção por volta de 550 milhões de anos atrás. Nesse intervalo, teriam surgido os primeiros animais com esqueleto, com um tipo de concha protetora, conhecido pelo nome de *Cloudina*, fóssil esse encontrado em vários continentes, como na África, onde foi originalmente descrito, América do Norte, Ásia e também na América do Sul (Brasil, Uruguai e Para-

guai). No Brasil, esse fóssil foi pela primeira vez reconhecido na região de Corumbá (MS), onde também ocorre outro curioso fóssil de nome *Corumbella*.

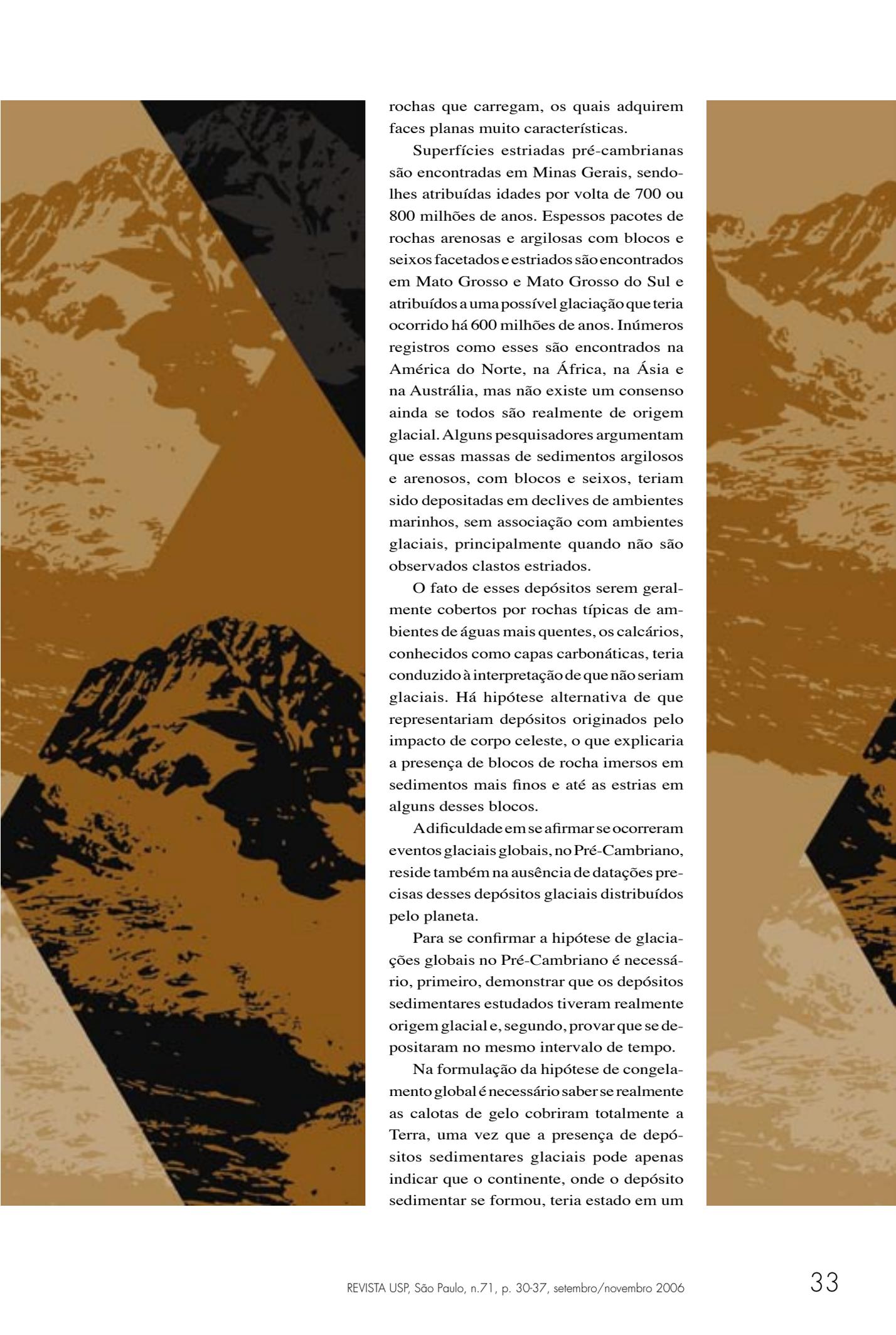
Por volta de 540 milhões de anos atrás, o que representa o final do Pré-Cambriano, essa monótona história da vida dá lugar a uma grande diversificação, a qual é denominada “explosão de vida cambriana”, em face do abundante registro de variadas formas de vida.

Resumindo a história geológica da vida, como já destacado pelo renomado paleontólogo Stefan Gould em seu livro *Vida Maravilhosa*, podemos dizer que foram 4 bilhões de formas simples, mas em grande quantidade, com os oceanos repletos de bactérias e cianobactérias. Por volta de 600 milhões de anos atrás revoluções biológicas passaram a ocorrer, com o surgimento e a extinção da fauna de Ediacara, surgimento de pequenos animais com esqueleto e, em seguida, num breve intervalo de tempo, em termos geológicos, com uma verdadeira explosão de diversificação biológica, há 540 milhões de anos, quando teriam surgido os animais e plantas pluricelulares a partir dos quais evoluíram todos os animais e plantas que atualmente ocupam a Terra, inclusive nós, seres humanos.

O que teria provocado essa revolução biológica é uma pergunta que os cientistas tentam responder. Curioso é que o intervalo de tempo no qual teriam se dado os preparativos para essa diversificação coincide com o registro da curiosa associação de rochas interpretadas como glaciais, cobertas por rochas carbonáticas, as quais vêm sendo conhecidas como “capas carbonáticas”.

Hipóteses de amplas glaciações no Pré-Cambriano já haviam sido levantadas em face do amplo registro de rochas indicativas desse tipo de sedimentação, mas faltavam dados mais precisos para confirmá-las.

Uma evidência segura da presença pré-terita de geleiras são superfícies estriadas. Espessos pacotes de gelo, de centenas até quilômetros de espessura, criam sulcos e estrias nas rochas sobre as quais deslizam através do atrito dos blocos e seixos de



rochas que carregam, os quais adquirem faces planas muito características.

Superfícies estriadas pré-cambrianas são encontradas em Minas Gerais, sendo-lhes atribuídas idades por volta de 700 ou 800 milhões de anos. Espessos pacotes de rochas arenosas e argilas com blocos e seixos facetados e estriados são encontrados em Mato Grosso e Mato Grosso do Sul e atribuídos a uma possível glaciação que teria ocorrido há 600 milhões de anos. Inúmeros registros como esses são encontrados na América do Norte, na África, na Ásia e na Austrália, mas não existe um consenso ainda se todos são realmente de origem glacial. Alguns pesquisadores argumentam que essas massas de sedimentos argilosos e arenosos, com blocos e seixos, teriam sido depositadas em declives de ambientes marinhos, sem associação com ambientes glaciais, principalmente quando não são observados clastos estriados.

O fato de esses depósitos serem geralmente cobertos por rochas típicas de ambientes de águas mais quentes, os calcários, conhecidos como capas carbonáticas, teria conduzido à interpretação de que não seriam glaciais. Há hipótese alternativa de que representariam depósitos originados pelo impacto de corpo celeste, o que explicaria a presença de blocos de rocha imersos em sedimentos mais finos e até as estrias em alguns desses blocos.

A dificuldade em se afirmar se ocorreram eventos glaciais globais, no Pré-Cambriano, reside também na ausência de datações precisas desses depósitos glaciais distribuídos pelo planeta.

Para se confirmar a hipótese de glaciações globais no Pré-Cambriano é necessário, primeiro, demonstrar que os depósitos sedimentares estudados tiveram realmente origem glacial e, segundo, provar que se depositaram no mesmo intervalo de tempo.

Na formulação da hipótese de congelamento global é necessário saber se realmente as calotas de gelo cobriram totalmente a Terra, uma vez que a presença de depósitos sedimentares glaciais pode apenas indicar que o continente, onde o depósito sedimentar se formou, teria estado em um

dos pólos ou próximo deles no momento da formação do depósito.

DETERMINAÇÃO DOS LOCAIS DE DEPOSIÇÃO GLACIAL

Paleomagnetistas são pesquisadores que interpretam a possível posição latitudinal pretérita, no globo terrestre, onde determinadas rochas se formaram.

No caso das rochas sedimentares, antes de adquirirem a forma sólida, suas partículas ficam livres e soltas. Ao se depositarem, caso apresentem algum tipo de resposta ao magnetismo, vão se orientar conforme o campo magnético da Terra, de forma semelhante ao comportamento da agulha de uma bússola. Dessa forma, minerais que respondem ao magnetismo da Terra ficam horizontais na faixa do Equador, adquirem a posição vertical nos pólos e inclinações intermediárias nas localidades intermediárias entre os pólos e o Equador.

Com base no princípio acima, um paleomagnetista, ao examinar a orientação dos minerais ferromagnesianos de uma amostra de rocha, pode dizer se ela se formou próximo do pólo ou do Equador.

Ao relacionar essa informação com interpretações de idade, tem-se um importante recurso para montar a paleogeografia do planeta Terra. São essas pesquisas, junto com outras evidências geológicas, que permitem conhecer como foi a movimentação das placas tectônicas. Dessa forma é possível também interpretar se um determinado depósito sedimentar, comprovadamente de origem glacial, teria sido depositado próximo aos pólos ou se seria resultado do avanço das calotas de gelo além dos círculos polares, o que indicaria um intervalo glacial.

FORMULAÇÃO DA HIPÓTESE SNOWBALL EARTH

Quem usou pela primeira vez o termo *Snowball Earth* para o controvertido mo-

delo segundo o qual a Terra teria estado totalmente congelada foi Joe Kirschvink, um paleomagnetista do California Institute of Technology (EUA). Essa hipótese foi apresentada de forma modesta em um texto publicado em 1992 em um livro a respeito da vida no Pré-Cambriano, organizado por Bill Schopf, da University of California (Los Angeles), quando a idéia de um resfriamento global da Terra, com a possibilidade de calotas de gelo terem atingido baixas latitudes, ou seja, faixas tropicais ou até mesmo próximo à linha do Equador, passou a ser mais comentada, porém, sem muita aceitação.

Amostras de rochas, interpretadas como depositadas em ambiente marinho sob influência de gelo, coletadas na Austrália, na Formação Elatina, foram dadas para a então estudante de graduação Dawn Summer, para seu trabalho de formatura, sob orientação de Joe Kirschvink. O objetivo era verificar a posição de deposição desses sedimentos glaciais, uma vez que o trabalho anterior havia demonstrado posições próximas ao Equador, o que parecia ser algo impossível de ter ocorrido. A aluna foi orientada a efetuar testes mais refinados de paleomagnetismo para verificar se a orientação dos minerais magnéticos correspondia ou não à orientação no momento de deposição. Esses testes deram resultados positivos, o que conduziu Kirschvink a formular a hipótese do *Snowball Earth*, com base na evidência de deposição glacial marinha em baixas latitudes do planeta.

Existem atualmente geleiras situadas em baixas latitudes, porém, encontram-se apenas em altas montanhas, o que não serve de comparação para os depósitos da Formação Elatina da Austrália, os quais têm demonstrado que as geleiras alcançaram posições próximas ao Equador.

Em revisão sobre os depósitos glaciais pré-cambrianos, apresentada em Evans (2000), foi demonstrado que grande parte desses depósitos glaciais teria se formado em regiões litorâneas e, em sua maioria, entre o Equador e o paralelo de 10°. Nenhum dos depósitos glaciais apresentou-se em paralelos maiores do que 60°.

Interpretação alternativa para explicar o aparente paradoxo da possível ocorrência de geleiras próximas ao Equador seria a de que o eixo de rotação da Terra seria mais inclinado, com maior incidência dos raios solares nos pólos. Mas essa hipótese não encontrou respaldo por implicar intenso contraste entre as estações do ano e, também, por não terem sido observadas evidências de sedimentos indicativos de águas quentes, como os calcários, em posições polares ou próximas a eles.

A hipótese *Snowball Earth* passou a ser mais debatida após a publicação de artigo na revista *Science*, em 1998, pelo grupo da Harvard University, liderado por Paul Hoffman, com estudos com base em levantamento de exposições na Namíbia, os quais chamaram a atenção para a importância das rochas carbonáticas que recobrem os depósitos possivelmente glaciais e denominados “capas carbonáticas”, as quais foram interpretadas como um processo de rápido derretimento das calotas de gelo, que, segundo esse grupo, teriam coberto totalmente o planeta.

Da mesma forma que chama a atenção a presença das capas carbonáticas associadas aos possíveis depósitos glaciais, outro depósito sedimentar incomum associado são as formações ferríferas bandadas, denominadas pela sigla BIF, de *banded iron formation*.

Formações ferríferas bandadas (BIFs) são encontradas em abundância em unidades geológicas mais antigas, como as do Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais, e as da Serra dos Carajás, na Amazônia, que constituem uma das maiores reservas de ferro do mundo, intensamente lavradas nos últimos anos. Os BIFs associados aos depósitos glaciais seriam diferentes quanto à origem, relacionados a um período de concentração do elemento ferro livre, sem oxidação, nas águas profundas dos oceanos, que teriam ficado pobres em oxigênio devido ao isolamento pela calota de gelo. Com o derretimento das coberturas de gelo e o enriquecimento das águas com oxigênio, teria ocorrido a deposição das formações ferríferas. Por outro lado, hipótese para

origem dessas formações ferríferas foi também aventada em relação a eventos hidrotermais, associados a falhamentos, sem a necessidade de associar esses depósitos a expressivos eventos de congelamento dos oceanos.

O foco dos estudos passou a ser dado na investigação pormenorizada das capas carbonáticas, as quais, nas inúmeras ocorrências distribuídas em diferentes continentes, demonstram sempre a mesma relação de isótopos de carbono. A relação entre átomos de ^{12}C e ^{13}C é tal que atingem o valor relativo, comparado a um determinado padrão, de -5% . A origem desse valor negativo, encontrado em todas as capas carbonáticas, inclusive nas do Brasil, tem sido atribuída à baixa ou praticamente nula atividade biológica até o final do degelo das calotas polares. Essa é uma interpretação ainda controversa, já que, ultimamente, evidências de atividade biológica contemporânea à sedimentação das capas carbonáticas, assim como da sedimentação glacial, vêm sendo encontradas, o que tem sido usado como argumento contrário à ocorrência de um congelamento completo do planeta, sem descartar a possibilidade de que as calotas polares tenham alcançado baixas latitudes. Assim, existe hipótese alternativa, segundo a qual os eventos glaciais teriam ocorrido, mas não de forma tão extrema a ponto de a Terra ter estado totalmente coberta por gelo.

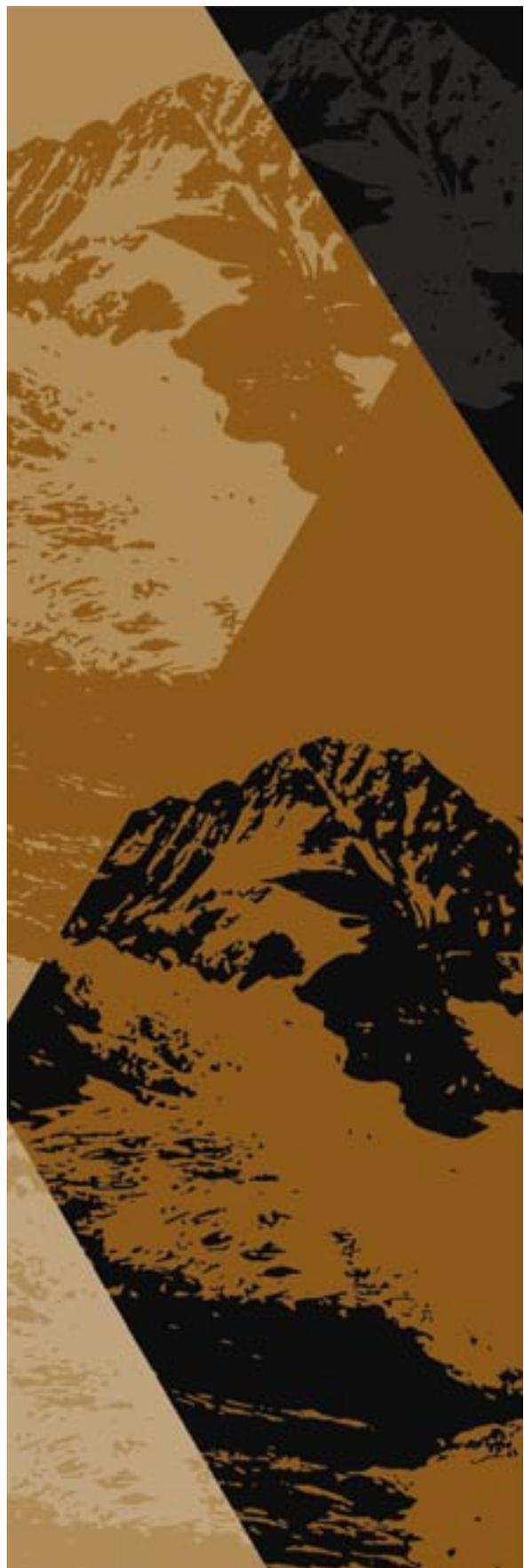
Tentativas para entender a distribuição no tempo e no espaço dos depósitos interpretados como glaciais no Pré-Cambriano têm demonstrado a ocorrência de, ao menos, dois eventos glaciais marcantes, um por volta de 730 milhões de anos atrás, denominado Sturtiano, e outro mais novo, ocorrido entre 600 e 630 milhões de anos atrás e conhecido por Marinoano. Outros possíveis eventos glaciais têm sido interpretados, como o Gaskier, por volta de 580 milhões de anos, mas esse possivelmente não tão intenso como se pensa terem sido os outros dois.

Uma explicação para a origem do congelamento tem por base a tectônica das placas. Dados de paleomagnetismo têm



possibilitado interpretar que, por volta de 800 milhões de anos atrás, todas as massas continentais teriam estado unidas numa massa única, formando um supercontinente de nome Rodínia, o qual provavelmente teria se posicionado na zona equatorial, onde o calor e a maior incidência de chuva teriam promovido intensa atividade de intemperismo e formação de solo. A consequência dessa especial conjectura teria sido excepcional para o processo de seqüestro de carbono da atmosfera, com fixação de gás carbônico nos solos formados e início de resfriamento global. Com a diminuição da temperatura, as calotas de gelo teriam se expandido, aumentando o albedo da Terra, ou seja, a reflexão dos raios solares pela superfície do planeta, os quais teriam sido 6% menos intensos do que os atuais devido ao processo de evolução estelar pelo qual o Sol tem passado. Segundo modelos climáticos, as calotas de gelo, ao atingirem os paralelos de 30°, tornariam o efeito de crescimento irreversível devido ao contínuo aumento do albedo da Terra e a consequência seria o recobrimento total do planeta por espessas capas de gelo.

Discussões ocorrem sobre se a vida, mesmo primitiva, teria sobrevivido a condições tão severas. Hipóteses têm sido formuladas no sentido de explicar que a vida teria ficado restrita a pequenas porções dos oceanos, onde fontes de água quente a teriam mantido enquanto perduravam as baixas temperaturas na Terra como um todo. Outra possibilidade seria a de que localidades onde o gelo era menos espesso, possivelmente na faixa do Equador, recebiam tênue incidência de luz, o suficiente para manter a sobrevivência de algumas formas de vida. Outra possibilidade seria a de que, nos limites de placas tectônicas, atividades magmáticas teriam mantido a temperatura relativamente elevada, tornando-se, assim, refúgio de vida. De qualquer forma, a mudança, brusca ou lenta, de uma situação de temperatura extremamente baixa para outra com temperaturas elevadas, proporcionando talvez uma das maiores situações de estresse ambiental pela qual a Terra já passou, teria sido a responsável pelas revoluções bioló-



gicas que proporcionaram o surgimento da vida animal na Terra.

A Terra, segundo o modelo proposto, teria saído da condição de congelamento com o início da separação das massas continentais, antes unidas num só continente, o Rodínia. Esses processos, conhecidos por rifteamento, são acompanhados de intensa atividade vulcânica e proporcionam exalação de grande quantidade de gás carbônico. Com o aumento do gás carbônico na atmosfera, o período glacial teria dado lugar ao início de um período de intenso aquecimento em função do efeito estufa.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O atual estágio sobre a hipótese de o planeta Terra ter estado totalmente congela-

do ou não, ou mesmo se ocorreram de fato marcantes eventos glaciais no Pré-Cambriano, é de intensa e profunda discussão. Os geocientistas têm procurado tirar o máximo de informações sobre as sucessões de rochas que teriam registrado esse intervalo de tempo. Novas técnicas analíticas têm proporcionado novas interpretações, mas ainda nenhuma conclusiva para provar ou não o modelo.

Existe a possibilidade de o modelo da Terra totalmente congelada não se sustentar cientificamente, mas algum evento global, ou mais de um, deve ter ocorrido no intervalo de tempo entre 700 e 540 milhões de anos atrás, sendo responsável pela quebra da monótona situação das primitivas formas de vida no planeta, por quase quatro bilhões de anos, e proporcionando o surgimento da vida animal, sem a qual a espécie humana e outras formas de vida não teriam evoluído.

BIBLIOGRAFIA

- EVANS, D. A. D. "Stratigraphic, Geochronological, and Paleomagnetic Constrains upon the Neoproterozoic Climatic Paradox", in *American Journal of Science*, 300, 2000, pp. 347-433.
- GOULD, S. J. *Vida Maravilhosa*. São Paulo, Companhia das Letras, 1990.
- HOFFMAN, P. & SCHRAG, D. P. "The Snowball Earth Hypothesis: Testing the Limits of Global Change", in *Terra Nova*, 14(3), 2002, pp. 129-55.
- KIRSCHVINK, J. L. "Late Proterozoic Low-latitude Global Glaciation: the Snowball Earth", in J. W. Schopf & C. Klein (eds.), *The Proterozoic Biosphere*. Cambridge, Cambridge University Press, 1992, pp. 51-2.
- SÍTIO NA INTERNET: www.snowballearth.org (acessado em 30/9/2006).
-