



BIOGEOGRAFIA

DA AMÉRICA DO SUL

Padrões & Processos

Organizadores
Claudio J. B. de Carvalho
Eduardo A. B. Almeida

ROCA

Evolução Geológica da América do Sul nos Últimos 250 Milhões de Anos

Ernesto Luiz Lavina

Gerson Fauth

Introdução

A história evolutiva da América do Sul nos últimos 250 milhões de anos está relacionada a uma sucessão de grandes eventos geológicos que modificaram tanto os continentes e as bacias oceânicas quanto o clima e a própria evolução das espécies.

A superfície terrestre está em transformação contínua ao longo do tempo. Não existe, em termos de história da Terra, qualquer fator natural que seja constante. A geografia planetária, por exemplo, quando visualizada em termos de tempo geológico, é extraordinariamente mutável. Cabe destacar que apenas no último bilhão de anos (cerca de 20% do tempo geológico), dois supercontinentes se formaram a partir da reunião de diversos continentes e ilhas, e se fragmentaram dando origem a novos continentes e ilhas (Rodínia: 650 a 600 Ma*, e Pangeia: 270 a 220 Ma). Como outros exemplos notáveis de mudanças paleogeográficas, podemos referir a Antártica, que hoje ocupa a região do polo sul, mas já esteve, juntamente com Austrália e Índia, na região polar ártica (há aproximadamente 700 Ma), ou o atual continente africano, uma série de ilhas há um bilhão de anos, agregadas durante a formação de Rodínia. Intimamente associados às modificações paleogeográficas, o vulcanismo e a fotossíntese adquirem papel fundamental na evolução do clima. Em verdade, papéis antagônicos, pois o vulcanismo adiciona CO₂ à atmosfera, enquanto a

fotossíntese o retira. Períodos de formação ou de desagregação de supercontinentes apresentam aumento significativo do vulcanismo, implicando em maior produção de CO₂ e, em consequência, amplificando o efeito estufa. Ao contrário, em fases de menor intensidade vulcânica, o fitoplâncton (e o solo) absorve CO₂, diminuindo sua concentração na atmosfera, fazendo com que o planeta esfrie.

Cadeias de realimentação ocorrem naturalmente, se relacionando a diversos fatores, desde a posição geográfica dos continentes (paleolatidade) até as variações na excentricidade da órbita terrestre e na obliquidade do eixo de rotação. Fator fundamental de realimentação climática para períodos frios é a presença de um continente em latitude polar. Uma calota polar posicionada diretamente sobre a água não afeta o nível do mar. Entretanto, se estiver situada sobre um continente, sua expansão acarreta, necessariamente, o rebaixamento do nível do mar. Em períodos mais frios, o gelo polar se expande em área e passa a refletir maior quantidade de luz solar de volta ao espaço, diminuindo a temperatura média do planeta. O gelo polar cresce às expensas da água do oceano, que pode rebaixar dezenas de metros em poucos milhares de anos. Em períodos de mar baixo, os continentes têm maior dificuldade de reter umidade e tendem a secar na faixa tropical (latitudes inferiores a 30°, onde ocorrem as maiores taxas de insolação e de evaporação). Os desertos se expandem rapidamente nesta faixa e os grãos de quartzo da areia das dunas têm capacidade quase igual à do gelo em refletir a luz solar para o espaço, tornando a Terra ainda mais fria. Uma cadeia de realimentação, como a descrita, é usada para

* A sigla Ma significa "milhões de anos".

contextualizar os grandes eventos glaciais, como o ocorrido no final do Pré-cambriano, no qual as evidências sugerem que toda a superfície da Terra tenha congelado, mesmo na faixa equatorial (o continente de Rodínia situava-se na região polar sul), Carbonífero (359 a 299 Ma), quando 25% da superfície da Terra ficaram cobertos por gelo (Gondwana ocupava o polo sul), ou mesmo o período glacial pelo qual passamos. Uma era glacial pode terminar, lentamente, pela movimentação de continentes para fora da região polar, ou abruptamente, em razão de uma fase de intensificação do vulcanismo. Em períodos de maior atividade vulcânica, a situação se inverte, o gelo se retrai e o mar se eleva, invadindo os continentes. Períodos de “mar alto” apresentam tendência a maior uniformidade climática e, com frequência, extensas áreas úmidas e grande desenvolvimento de florestas.

Cabe, portanto, destacar que na história da Terra, o único fator imutável é a continuidade das transformações. Neste sentido, os últimos 250 Ma da história de nosso planeta apresentam muitas particularidades. Durante este tempo, incomensurável para a percepção humana, mas que corresponde a apenas 5% da história da Terra, surgiram dois novos oceanos (Atlântico e Índico), e o supercontinente Pangeia se dividiu em várias partes, dando origem aos continentes atuais. Associado às imensas variações na geografia planetária, também o clima passou por grandes transformações. O intenso vulcanismo associado à existência da Pangeia, desde a sua formação (Permiano e Triássico) até a fragmentação (Jurássico e Cretáceo), produziu um efeito estufa tão intenso que ocasionou o desaparecimento total do gelo da superfície da Terra, mesmo nas regiões polares. Como consequência, a formação da Pangeia provocou também drásticas alterações na dinâmica dos seres vivos. As biotas empobreceram em gêneros e espécies na passagem do Permiano ao Triássico (250 Ma). Em verdade, o evento de extinção de biomassa, ocorrido neste momento, é considerado a maior crise da história da vida na Terra. As evidências sugerem que mais de 90% das espécies tenham-se extinguido em tempo relativamente curto. A grande extensão da Pangeia, que dificultava ou mesmo impedia a distribuição da umidade para o interior, a progressiva retração areal dos mares rasos epicontinentais, o vulcanismo e o efeito estufa decorrentes, são alguns fatores considerados cruciais para a redução drástica do bioma. Neste tempo, as latitudes altas eram mais favoráveis à vida sobre a Terra^{1,2}. No início do Triássico, florestas e faunas de répteis e répteis mamíferos se desenvolviam em paleolatitudes tão altas quanto 80° sul (região das atuais montanhas Transantár-

ticas). Durante o Mesozoico, crocodilos e dinossauros habitaram diversas regiões circumpolares do hemisfério norte (Groenlândia, Alasca e Sibéria) e dinossauros viveram na Península Antártica durante o Cretáceo. O efeito estufa sofreu leve arrefecimento ao final do Cretáceo, mas fortaleceu-se novamente no início da era Cenozoica, e somente perdeu intensidade a partir do período entre 45 e 40 Ma, quando a Antártica, que havia saído da região polar durante o Mesozoico, retornou ao círculo polar. Desde então, o gelo passou outra vez a fazer parte da história da Terra. Os principais eventos geológicos e climáticos ocorridos na América do Sul são apresentados na Figura 1.1.

A história acima resumida, envolvendo extraordinárias mudanças geográficas e climáticas, é uma aquisição relativamente recente, pois apenas a partir da década de 1970 passou a ser bem entendida. Resulta, porém, de esforços da comunidade científica durante cerca de 300 anos. Pode-se dizer que tenha se iniciado durante os séculos XVIII e XIX, quando houve grandes avanços na cartografia, no detalhamento de mapas e pesquisas em ciências naturais em regiões inóspitas, distantes da Europa. Com certa regularidade, alguns países europeus lançavam grandes expedições científicas aos “novos mundos” no intuito de conhecer e descrever fauna, flora e geografia locais (por exemplo, trabalhos de Humboldt, Darwin e Saint Hilaire). Desde o surgimento dos primeiros mapas mundiais, a coincidência dos contornos da América do Sul e da África intrigou as mentes mais imaginativas sobre o cataclisma que os teria separado (Francis Bacon, 1620; Antônio Snider-Pellegrini, 1858; e Marcel Bertrand, Frederick B. Taylor e Edward Suess; na passagem do século XIX ao século XX). Em 1912, um meteorologista alemão, Alfred Lothar Wegener, surpreendeu o mundo científico ao apresentar a tese de que os continentes atuais estiveram todos reunidos, no final do Paleozoico e início do Mesozoico, em um único continente, ao qual chamou de Pangeia. Segundo Wegener, a Pangeia teve curta duração, tendo se fragmentado em dois continentes maiores, Gondwana, ao sul, e Laurásia, ao norte. Posteriormente, a Laurásia fragmentou-se em América do Norte e Eurásia (a Groenlândia, em termos geológicos, faz parte da América do Norte) e Gondwana em Índia, Austrália, Antártica, África e América do Sul.

A chave para Wegener montar o quebra-cabeças e sustentar a “teoria da deriva dos continentes” veio da similaridade das linhas de costa dos continentes, do registro fóssil, pois organismos semelhantes eram encontrados em continentes separados por vários milhares de quilômetros, e também da evolução climática. Répteis terrestres do início do Triássico, como os gêneros

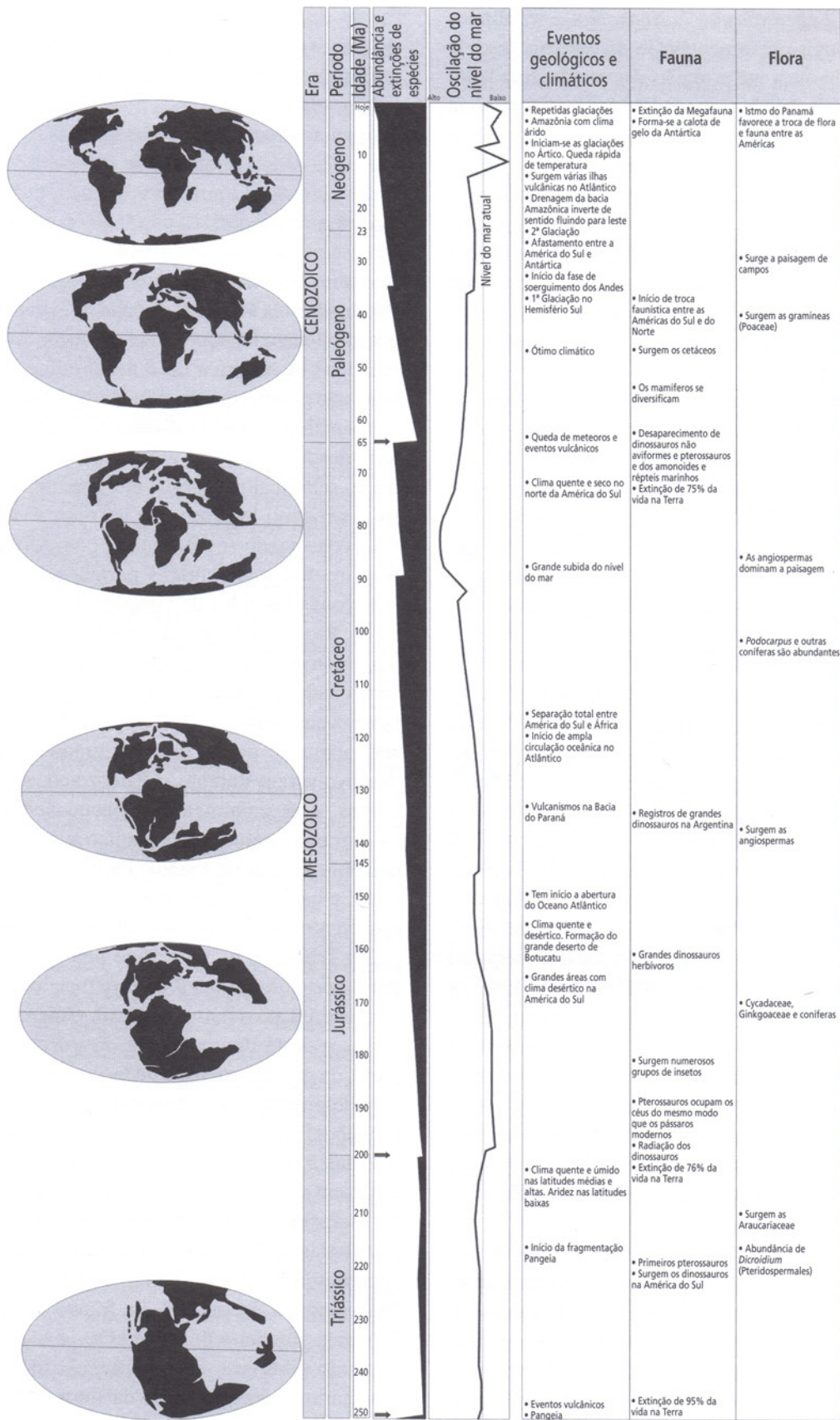


Figura 1.1 – Evolução paleogeográfica e eventos geológicos, climáticos e alterações na flora e na fauna da América do Sul nos últimos 250 Ma¹⁻²⁶. Ma = milhões de anos. As setas indicam os eventos de grande extinção da vida na Terra.

Procolophon, *Lystrosaurus* e *Thrinaxodon*, encontrados em quase todos os continentes (se distribuem desde a plataforma siberiana até a região das montanhas Transantárticas), deixam claro a continuidade da superfície emersa, a não existência de barreiras geográficas e a notável uniformidade climática. Todavia, talvez a corroboração mais impressionante da teoria seja a explicação da distribuição geográfica dos carvões e dos depósitos glaciais do período Carbonífero (300 Ma). O carvão foi gerado por florestas de latitudes equatoriais, mas está hoje localizado em regiões subtropicais (Estados Unidos e Europa). Depósitos associados às geleiras do Carbonífero são encontrados em todos os continentes do hemisfério sul e na Índia. Observados no mapa atual, a distribuição do carvão e dos depósitos glaciais é absolutamente inexplicável, pois teríamos de admitir, além de florestas “equatoriais” em latitudes hoje improváveis, geleiras em latitudes baixas, como no Brasil, onde depósitos glaciais ocorrem desde o Rio Grande do Sul até Mato Grosso do Sul e Goiás (Grupo Itararé, da Bacia do Paraná), ou como no caso da Índia, na região equatorial. Quando Wegener reuniu todos estes elementos sobre o mapa da Pangeia, a área sob influência glacial demarcou a região polar (sul) e as florestas ocuparam a região equatorial do planeta. Entretanto, apesar de não haver qualquer elemento falseador da nova teoria, ela foi absolutamente rejeitada pela comunidade científica do início do século XX. E não se pense que os cientistas da época eram refratários às novas ideias; o início do século XX foi o tempo de Albert Einstein, Max Planck, Rutherford, Niels Bohr e Werner Heisenberg; foi o tempo da teoria do átomo, da teoria da relatividade e das mecânicas quântica e ondulatória. Os pesquisadores não conseguiam entender, e Wegener não conseguiu explicar, como os continentes se moviam. Ou, dito de outro modo, como poderiam imensos continentes andar pelo mundo “à deriva”, como jangadas ao sabor dos ventos e correntes marítimas? As ideias de Wegener somente começaram a ser aceitas durante a década de 1960, quando as anomalias magnéticas dos basaltos oceânicos demonstraram, de modo inequívoco, as taxas de geração e espalhamento do assoalho oceânico.

A visão que temos hoje do continente sul-americano, cercado por oceanos e quase isolado, teve início apenas a partir da desagregação da Pangeia (durante o Triássico, há cerca de 230 Ma). De fato, separada relativamente cedo do continente do norte (Laurásia), a América do Sul apresentava ligação apenas com Antártica e Austrália (pela Península Antártica), desenvolvendo biotas autóctones, algumas extraordinárias, como as faunas de marsupiais cenozoicos. Apenas o progressivo soergui-

mento da América Central durante o Cenozoico modificou esta situação, propiciando vários pulsos de imigração e substituição progressiva da fauna ancestral pela originária da América do Norte, em fuga da glaciação que se desenvolvia no hemisfério norte.

Início

No começo da era Mesozoica, a geografia planetária era dominada pela Pangeia, cercada por um único e imenso oceano (Panthalassa, cuja representação atual é o Oceano Pacífico). A América do Sul, tal como a conhecemos hoje, não possuía qualquer individualização com relação aos demais terrenos gondwânicos. Poder-se-ia seguir por terra desde a região do atual Brasil até a Índia ou Austrália, sem qualquer obstáculo importante. O território sul-americano localizava-se no setor sudoeste da Pangeia, conectando-se diretamente com África e Antártica. Suas rochas mais antigas pertencem aos crátons do Amazonas (escudos de Guaporé e Guiana), São Francisco, Rio da Prata, São Luiz e Luis Alves, e registram uma história geológica anterior a um bilhão de anos, fornecendo elementos importantes para a construção da história pré-cambriana da Terra³. Sobre os crátons, bacias sedimentares, por vezes com grandes dimensões, se desenvolveram durante o Paleozoico. As rochas mais jovens, e especialmente as bacias sedimentares que evoluíram durante o Mesozoico e o Cenozoico (por exemplo, Bacias do Paraná, Parnaíba, Amazonas, Neuquén, e bacias da margem andina), estão relacionadas aos eventos geológicos ocorridos nos últimos 250 Ma.

No Triássico, o clima árido predominava em toda a parte norte, desde o sul da província de Buenos Aires (Argentina) até o norte do Brasil, Guianas, Venezuela e margem oeste do continente. Era decorrente, em boa parte, da grande extensão de terras em latitude tropical² e do desenvolvimento de um sistema mundial de megamonções⁴. As condições de maior umidade estavam restritas à parte sul (hoje Terra do Fogo e Patagônia), onde, em muitos momentos, florestas se desenvolveram. Na margem oeste, em vez da Cordilheira dos Andes, um imenso sistema vulcânico, que se tornou ativo na parte superior do Permiano (Formação Choyoi; cerca de 270 Ma), ainda se encontrava em franco desenvolvimento. Produzia grandes volumes de CO₂ e se somava ao vulcanismo siberiano na manutenção do efeito estufa planetário. A metade norte da futura América do Sul, durante fases menos secas, era ocupada por uma flora em que dominavam as gimnospermas e faunas de répteis e répteis mamaliformes. Fragmentos deste tempo ficaram

preservados em poucos locais da América do Sul, com destaque para a região central do estado do Rio Grande do Sul (Formações Santa Maria e Caturrita, da Bacia do Paraná) e a Bacia de Ischigualasto, no noroeste da Argentina (Província de San Juan). Nestes locais, as evidências mostram que os cinodontes, ancestrais dos mamíferos, já construíam mecanismos internos cada vez mais eficientes para a regulação da temperatura corporal. Também demonstram, objetivamente, que, emergindo de um grupo inexpressivo de répteis, os primeiros dinossauros caminharam sobre o território sul-americano, espalhando-se, logo depois, por toda a Pangeia.

Abertura do Oceano Atlântico

A separação entre continentes envolve longos períodos, estando sempre ligada a episódios vulcânicos importantes, extensas regiões afetadas por terremotos, soerguimentos e rebaixamentos de grandes áreas, eventos que foram marcantes para a história geológica da América do Sul e que ocorrem até os dias de hoje.

A abertura e o surgimento do Oceano Atlântico teve início após a separação da Pangeia, durante a fase de fragmentação de Gondwana, ocorrida ao final do Triássico e início do Jurássico. A divisão África-América do Sul deu-se a partir dos extremos norte e sul, como duas separações continentais praticamente simultâneas. A primeira iniciou-se há cerca de 220 milhões de anos, na região da Venezuela, e está relacionada à separação entre o norte da África e a América do Norte. O segundo evento de separação começou há 200 milhões de anos ao sul da Argentina (região ao norte das Ilhas Malvinas) e África do Sul. Naquele momento, Gondwana já estava dividido em distintos continentes (América do Sul-África, Índia e Antártica-Austrália, embora ainda existisse comunicação entre América do Sul e Antártica-Austrália). Estas aberturas oceânicas ao norte e ao sul funcionaram como um “zíper”, em que a crosta oceânica foi sendo rasgada de leste-oeste na região da Venezuela e sul-norte a partir da Argentina.

A abertura do Oceano Atlântico ocorreu em função da ascensão de magma do manto (*hot spots*), com geração de crosta oceânica. A partir da criação de crosta oceânica na dorsal do Atlântico, as placas tectônicas sul-americana e africana começaram a se movimentar em sentidos opostos. A abertura do Atlântico pode ser subdividida em cinco fases distintas:

- *Processos extensionais*: em que a crosta terrestre da região começou a ser estendida e afinada, iniciando o processo de separação entre os dois continentes.

- *Falhamentos*: na região da separação onde a crosta se tornou mais fina ocorreram grandes falhamentos, pelos quais extravasaram as primeiras lavas. Os sistemas de falhas também movimentaram verticalmente os blocos e o rebaixamento de extensas áreas possibilitou a criação de grandes lagos.
- *Afinamento Crustal*: rebaixada (estirada e afinada), a crosta recebeu sedimentos continentais e derrames de lava. Ocorreram também as primeiras incursões marinhas.
- *Vulcanismo*: as rochas vulcânicas são responsáveis pelo acréscimo de crosta. Formaram-se os primeiros depósitos de evaporitos (sais) no proto-oceano Atlântico, concentrados principalmente nas bacias da região sudeste do Brasil e nas bacias africanas em Angola. Surge a cadeia mesoceânica.
- *Oceano aberto*: o Oceano Atlântico aumenta de largura e inicia a circulação oceânica e a sedimentação carbonática marinha⁵.

Anterior ou ao longo do estiramento da crosta terrestre e da formação do Atlântico, algumas feições geológicas diferentes foram produzidas. O atual Rio da Prata encaixou-se em fraturas e falhas geológicas ortogonais à direção da abertura atlântica durante o Cretáceo Inferior⁶. A Serra da Mantiqueira, já existente desde 500 Ma, foi reativada e soerguida durante o Cretáceo Superior (aproximadamente 80 Ma), fazendo com que a direção do sistema fluvial e, em consequência, do aporte sedimentar das bacias do Paraná e Santos, se alterasse. Outras feições produzidas foram as bacias sedimentares do Recôncavo e Tucano, próximo a Salvador, e São Jorge, no sul da Argentina, que seriam direções onde a ruptura começou, no início do Cretáceo, mas não se desenvolveu (aulacógenos: não houve geração de crosta oceânica). O último elo da ligação física entre América do Sul e África se rompeu no início do Cretáceo (110 Ma) e estava relacionado às rochas antigas da província Borborema⁷, localizada na região entre os estados de Sergipe e Rio Grande do Norte, no Brasil, e a Nigéria, na África. Exemplo atual para ilustrar como teria ocorrido a separação entre América do Sul e África é encontrado na região leste do continente africano. A visualização de um mapa geográfico revela a existência de uma série de lagos alinhados a grandes sistemas de falhamento. Com efeito, nesta região o magma do manto forçou a crosta, rompendo-a, com abatimento de grandes blocos (*rift valleys* africanos), que se transformaram em lagos relativamente profundos (por exemplo, Niassa, Tanganica, Kivu e Albert). Mais a norte, o golfo de Áden e o Mar Vermelho exibem o estágio posterior,

quando ocorreu formação de crosta oceânica e a crosta continental já está dividida em duas placas (placa Africana, a sul e placa da Arábia, a norte). O rebaixamento crustal decorrente fez com que a água oceânica ocupasse toda a região. O Oceano Atlântico, em seu início, foi semelhante ao Mar Vermelho, apenas com extensão maior. E o Mar Vermelho, no futuro geológico, caso haja o rompimento de uma estreita faixa de terra, poderá se unir ao Mar Mediterrâneo, dando origem a um novo oceano, tal como aconteceu no passado com o Atlântico.

A fragmentação da Pangeia e de Gondwana ao longo do Cretáceo produziu estiramentos crustais, rebaixando a crosta continental, e provocou elevação progressiva do nível do mar. A invasão, pelo mar, de grandes extensões continentais permitiu o estabelecimento de condições úmidas e desenvolvimento de florestas em vários continentes. De um modo geral, porém, após a separação da África, a metade norte da América do Sul continuou sob clima quente e seco até o final do Mesozoico. Em toda esta extensa região, as fases úmidas foram relativamente raras e, ao contrário, em vários locais, são encontradas evidências de condições áridas (por exemplo, Formações Guará [final do Jurássico/início do Cretáceo], Botucatu e Grupo Bauru [Cretáceo] na Bacia do Paraná; Formações Corda e Grajaú [Cretáceo] na Bacia do Parnaíba). Cabe destaque ao “deserto de Botucatu”, com idade de 130 Ma (Cretáceo), cujas dunas encobriram desde o norte do Uruguai e Argentina, parte do Paraguai até o sul do Estado do Mato Grosso, sendo comparável ao deserto do Saara.

A Patagônia e o norte da Península Antártica, entretanto, na maior parte do tempo mantiveram-se em condições de clima mais úmido, com extensas florestas onde evoluíram notáveis paleofaunas de dinossauros. As fases marinhas, no grande golfo formado durante o Jurássico (Bacia de Neuquén, Argentina), aberto para o Pacífico, são marcadas por exuberante paleofauna de invertebrados e também por abundantes peixes e répteis aquáticos (ictiossauros, plesiossauros, pliossauros e tartarugas).

Soerguimento da Cordilheira dos Andes

A faixa andina compreende uma grande cadeia de montanhas que se estende por quase 9.000km de extensão, desde o extremo sul do Chile até o norte da Colômbia, possuindo entre 250 e 900km de largura. A geomorfologia atual dos Andes apresenta basicamente três distintos relevos:

- *Região norte*: onde os Andes estão segmentados em diferentes cadeias de montanhas.
- *Região central*: com os maiores cumes e maior largura, com destaque ao cerro Aconcágua com 7 mil metros acima do nível do mar (fronteira entre Argentina e Chile, próximo a Mendoza).
- *Região sul*: mais estreita e com montanhas de menor altitude^{6,8}.

Como mais um notável exemplo da mutabilidade da superfície terrestre, hoje a faixa andina apresenta montanhas com grande altitude, mas no passado, anterior às montanhas, exibia terrenos mais planos, semelhante aos que hoje existem na margem do Atlântico.

A cordilheira dos Andes evoluiu de distintos modos ao longo de sua grande extensão, em razão das variações nos esforços tectônicos. Nos últimos 200 milhões de anos, dois grandes eventos contribuíram para formar a geografia andina atual. O primeiro foi relacionado à separação da África e à migração do continente sul-americano para oeste. Esta migração fez com que fosse gerada uma tensão no limite com a placa de Nazca (uma das placas tectônicas que compõem o assoalho do Oceano Pacífico), gerando espessamento da crosta e produzindo as primeiras elevações do terreno, associada à cadeia de picos vulcânicos. O segundo e mais forte evento iniciou-se no fim do Mesozoico e esteve relacionado à intensificação dos esforços convergentes no limite com a placa de Nazca, gerando um cordão montanhoso (Patagonides). A principal consequência foi a subducção da placa de Nazca por baixo da placa sul-americana provocando espessamento da crosta sul-americana, em consequência da compressão dos sedimentos da margem continental. Subducção ocorre quando a resistência das rochas é vencida pelo acúmulo de pressão em decorrência de movimentos contrários e, neste caso, a placa com crosta oceânica, mais densa, se desloca para baixo, em sentido ao manto. Esta é a explicação para a existência da fossa do Peru-Chile no bordo oeste do continente. O desenvolvimento de uma zona de subducção no bordo oeste da América do Sul teve grandes repercussões, dando forma ao relevo atual daquela região. Na Patagônia, a pendente regional se inverteu de oeste para leste e, na parte norte, o mar passou a entrar no continente a partir do Atlântico.

No início do Oligoceno (34 Ma) a intensidade dos esforços na borda oeste da América do Sul aumentou e o soerguimento dos Andes foi acelerado. Como consequência, maior volume de rochas da placa de Nazca penetrou sob a placa sul-americana. O ângulo de penetração da placa de Nazca tem variado ao longo do

tempo nas distintas regiões e isto tem reflexo direto sobre o vulcanismo. Na região central do Andes, por exemplo, o ângulo de subducção é baixo (5°) e o vulcanismo é quase inexistente, ao passo que em outras regiões, onde o ângulo é maior, o vulcanismo é mais intenso⁶.

A intensificação do soerguimento dos Andes provocou substanciais mudanças ambientais e climáticas no bordo oeste da placa sul-americana. Na região da Amazônia, a pendente regional foi invertida e a drenagem, que fluía em sentido ao Oceano Pacífico, se inverteu, dirigindo-se, a partir de agora, ao Oceano Atlântico⁹. A região do pantanal mato-grossense também foi afetada, tendo o escoamento sido dificultando em decorrência da fase mais moderna do soerguimento dos Andes¹⁰. No norte da Patagônia Argentina, o mar interior que existia a leste dos Andes desde o início da era Cenozoica desapareceu e o clima tornou-se extremamente árido. A mudança do clima úmido para desértico na Patagônia é explicada pelo “efeito de sombra de barreira”, ou seja, antes dos Andes, nas latitudes superiores a 35° sul, a circulação atmosférica dominante dirigia o vento úmido do Oceano Pacífico diretamente para o interior do continente (ventos contra-alísios ou *westerlies*, relacionados à rotação da Terra). Com o aparecimento das montanhas, o ar úmido do oceano necessita se elevar alguns milhares de metros, esfriando e perdendo capacidade de reter umidade. Deste modo, a umidade fica retida no lado andino do Pacífico (Chile). Ao cruzar a cordilheira, o vento se torna extremamente seco e, quando baixa à Patagônia Argentina, se aquece novamente e passa a retirar umidade do solo, ressecando-o. Ao contrário da Patagônia, o deserto de Atacama, por se situar no lado oeste da América do Sul (norte do Chile), em latitude inferior a 30°, apresenta circulação atmosférica dominada pelos ventos alísios, que se movem de leste-sudeste para oeste-noroeste. Têm, portanto, que atravessar todo o continente sul-americano, deixando boa parte da umidade pelo caminho. Depois de subir a cadeia andina, frio e completamente seco, o vento induz grande ressecamento em toda a região. Cabe destacar que a circulação atmosférica terrestre tende, nas latitudes tropicais, a tornar mais úmido o bordo leste dos continentes e mais árido o bordo oeste. A situação se inverte na faixa subtropical.

Na parte média do Mioceno (14 Ma), em uma fase relativamente quente e úmida da Terra, o mar encobriu grande parte da América do Sul, Europa e Ásia. No território sul-americano, em parte também em consequência da flexura de uma faixa interna paralela aos Andes, um grande braço de mar interior se estendeu

desde a Amazônia até a Patagônia, limitado, a oeste, pela cadeia andina, e a leste, pelo escudo brasileiro¹¹. O escudo das Guianas, a norte, e o escudo Brasileiro (Uruguai e regiões sul, sudeste, centro-oeste e nordeste do Brasil) tornaram-se, neste tempo, grandes ilhas.

Vulcanismo Cretácico na Margem Leste da América do Sul

A América do Sul possui muitos registros de eventos vulcânicos e hoje, na cadeia andina, muitos vulcões estão em atividade. Contudo, durante o Cretáceo, em um momento anterior, portanto, ao soerguimento dos Andes, o continente foi palco de um dos maiores eventos vulcânicos da história geológica da Terra. Deste episódio, de curta duração temporal, resultou a estruturação do que hoje conhecemos como a Serra Geral, região com predominância de relevo do tipo planalto, com altitude moderada a alta, e dominada por rochas de origem vulcânica. Vestígios dos derrames de lava são encontrados na região sudeste da América do Sul, dentro dos limites da bacia sedimentar do Paraná, estendendo-se por ampla região que inclui o sul do Mato Grosso, Goiás e Minas Gerais, oeste de São Paulo, Paraná e Santa Catarina, norte e oeste do Rio Grande do Sul, nordeste da Argentina, oeste do Uruguai e sudeste do Paraguai. As rochas vulcânicas estão espalhadas em área aproximada de 1,2 milhão de km² (equivalente à extensão areal do Peru), podendo atingir até 1.700m de espessura no oeste do estado de São Paulo. Nos estados de Santa Catarina (Serra do Rio do Rasto) e Rio Grande do Sul (Aparados da Serra) existem taludes verticalizados onde podem ser observados vários derrames.

Eventos vulcânicos são quase sempre associados aos vulcões isolados, cujas erupções geram edifícios vulcânicos em forma de grandes cones. Entretanto, o vulcanismo que ocorreu na margem leste da América do Sul foi diferente. Sua origem está relacionada à grande e praticamente interminável fonte de calor que se instalou abaixo da crosta, na região próxima à divisa entre os estados de Goiás e Mato Grosso. Esta fonte de calor, que pode ser designada como pluma mantélica (*hot spot*), pode ser explicada como uma bolha de magma com grandes proporções e alta temperatura, originária de região profunda do manto terrestre. Teria subido atravessando o manto e se posicionado na parte inferior da crosta continental sul-americana. Este material forçou e enfraqueceu a crosta até que, por grandes fraturas, o magma ascendeu e extravasou lavas de composição

básica e ácida. As erupções vulcânicas que formaram a Serra Geral ocorreram no início do Cretáceo, entre 137 e 127 Ma. Os derrames se iniciaram na região norte da Bacia do Paraná (divisa de Goiás com Minas Gerais) e foram migrando para sul através do tempo, de modo que os últimos eventos se deram no Uruguai. Em verdade, a pluma mantélica se manteve estacionária e a variação regional do vulcanismo registra o deslocamento do continente para norte durante este período¹².

Extinções em Massa

Ao longo dos últimos 250 milhões de anos, vários eventos de extinção eliminaram diferentes níveis de vida (flora e fauna) em toda a superfície da Terra. Estes eventos, catástrofes com relação à vida, são importantes marcadores de fim e início de eras e períodos da escala do tempo geológico. O conteúdo fossilífero e as características dos estratos sedimentares são estudados visando compreender os fenômenos físicos envolvidos, buscando revelar quais teriam sido as causas potenciais para o desequilíbrio ambiental dos grupos orgânicos afetados (fatores climáticos e/ou geográficos, ou mesmo externos à Terra). A expressão “evento de extinção em massa” é usada quando a extinção acontece em tempo geológico extremamente curto, afetando grande diversidade de organismos que ocupam diferentes ambientes ou nichos ecológicos, e elimina um percentual significativo de famílias, classes ou mesmo filos. Como parâmetro, é importante salientar que se analisa na escala do tempo geológico e, por conseguinte, alta taxa de mortalidade, perceptível na ordem de grandeza de 1 milhão de anos, pode ser considerada como muito rápida.

O estudo sistemático mostrou que várias causas naturais podem ser atribuídas para explicar o desaparecimento de grupos de organismos em curto intervalo de tempo. Entre estas se destacam mudanças climáticas, impactos de meteoros, rebaixamentos do nível do mar em decorrência de eras glaciais, vulcanismo e, em ambientes marinhos, mudança no padrão de circulação das correntes oceânicas e disponibilidade de nutrientes.

A Terra registra cinco grandes eventos de extinção em massa que provocaram sérias alterações na vida da Terra nos últimos 700 Ma. Três destas extinções ocorreram nos últimos 250 Ma:

- Na passagem do Permiano ao Triássico, há 245 Ma (eliminou 95% das espécies).
- Limite Triássico-Jurássico, há 208 Ma (eliminou 76% das espécies).

- Limite Cretáceo-Paleógeno, há 65 Ma (eliminou 75% das espécies)¹³.

A extinção do limite Permiano-Triássico se deu em intervalo de aproximadamente 1 milhão de anos e estaria relacionada à combinação de mudanças na paleogeografia e queda do nível do mar (encurtamentos crustais decorrentes da formação da Pangeia), ao intenso vulcanismo e às alterações climáticas consequentes (desertificação). Foi a maior crise da história da Terra, afetando linhagens muito antigas de anfíbios e répteis, que desapareceram, restando, no início do Triássico, diversidade faunística muito baixa e nichos ecológicos quase vazios e prontos para serem ocupados por espécies oportunistas¹⁴. Esta extinção constitui-se em um dos principais campos de estudo da ciência geológica, para onde converge a atenção de pesquisadores de muitas especialidades diferentes¹⁵. Por sua vez, a extinção do limite Triássico-Jurássico foi mais seletiva, afetando principalmente as floras *Thinnfeldia* e *Dicroidium*, grandes anfíbios e répteis sinápsidos e arcossáurios (com exceção dos dinossauros). No final do Triássico, decorridos mais de 30 Ma da grande crise do limite Permo-Triássico, a fauna reptiliana estava novamente muito diversificada. Com a crise do limite Triássico-Jurássico, porém, a diversidade faunística reduziu outra vez. Não tendo sido afetados de modo significativo, os dinossauros, no início do Jurássico, estavam habilitados ao domínio absoluto dos continentes. A “era dos dinossauros”, de fato, inicia-se a partir deste evento. Hipóteses para explicar a crise do limite Triássico-Jurássico incluem desde erupções vulcânicas maciças, queda no nível do mar, mudanças no clima até impacto de meteoro, mas até o momento não há consenso sobre o que de fato teria ocorrido. Existe a suspeita de que as alterações na vegetação, com supressão de grupos importantes e expansão das coníferas^{16,17}, tenha afetado diretamente aos herbívoros e, em consequência, também aos carnívoros.

Durante a passagem Cretáceo-Paleógeno, as extinções aconteceram em curto intervalo de tempo geológico, inferior a 500 mil anos, em razão principalmente da queda de um grande meteoro no golfo do México. No início da década de 1990, foi encontrada uma grande cratera de impacto na região de Chicxulub, na atual península de Yucatán, com diâmetro de 170km, formada pelo choque de um meteoro com cerca de 10km de diâmetro. A energia liberada pelo choque deste bólido com a Terra seria equivalente a várias vezes a detonação simultânea de todo atual arsenal atômico da Terra¹⁸. Este impacto provocou drásticas mudanças ambientais rela-

cionadas ao intenso calor gerado no momento do choque, grandes incêndios, noites intermináveis pelo acúmulo de pó na atmosfera superior, ocasionando o bloqueio da radiação solar e, em consequência, frio glacial, mudanças na química das águas do mar e oscilação do nível nos oceanos. Estas mudanças afetaram rapidamente toda a cadeia alimentar. A fotossíntese pode ter deixado de acontecer durante alguns anos, em decorrência do bloqueio da entrada de luz solar^{19,20}.

As suspeitas de que a extinção dos dinossauros poderia ter sido ocasionada pela queda de um meteoro se iniciaram a partir do estudo de algumas regiões onde são encontradas rochas do limite Cretáceo-Paleógeno. Nestes locais, no ponto exato do limite existem camadas centimétricas de rochas sedimentares com altos teores do elemento químico irídio, comumente encontrado em meteoros. Ao contrário do que ocorreu com a extinção do Permo-Triássico, no qual as rochas não ficaram preservadas, o limite Cretáceo-Paleógeno pode ser encontrado em uma dezena de locais onde as evidências do evento são abundantes.

Na América do Sul três seções são conhecidas por possuírem rochas bem preservadas da passagem Cretáceo-Paleógeno: Bacia de Neuquén, na Argentina e Bacias de Campos e Pernambuco, no Brasil. O limite Cretáceo-Paleógeno em Pernambuco aflora em uma pedreira localizada a 30km ao norte da cidade de Recife e registra drástica mudança na microfauna marinha (por exemplo, ostracodes, foraminíferos, radiolários).

Além destes grandes eventos de extinção, ocorreram muitos outros episódios de redução na diversidade da flora e da fauna. O início do Eoceno (55 Ma) foi um período de grandes desequilíbrios, com extinção de muitos foraminíferos bentônicos nos oceanos. É bastante provável que a temperatura média global tenha se elevado cerca de 6°C em 20 mil anos²¹. O efeito estufa decorrente, conhecido como “máximo termal do Eoceno”, deve ter liberado o metano aprisionado no fundo dos oceanos, injetando ainda mais CO₂ na atmosfera. Como resultado, houve acidificação das águas e expansão da zona anóxica nos oceanos. Mas, a partir do máximo termal, o plâncton marinho passou por uma fase de grande expansão e, nos continentes, as florestas tiveram sua área muito aumentada e os mamíferos modernos iniciaram o seu grande desenvolvimento. Ao final do Mioceno (5 Ma), 30% das espécies de mamíferos desapareceram e existe a possibilidade de que isto tenha ocorrido em tempo muito curto e possa representar episódio de extinção de massa. Nas Américas, no Pleistoceno (10 mil anos), grandes mamíferos desapareceram²², em percentuais que podem ultrapassar 50%.

Muitos, como mamutes, mastodontes, tigre dentes de sabre e preguiças gigantes se extinguíram de fato, enquanto outros, como elefantes, cavalos e camelos, desapareceram apenas nos continentes americanos, pois, de modo geral, Europa, Ásia e África foram menos afetadas.

Glaciação

A uniformidade climática do Mesozoico continuou por mais alguns milhões de anos durante a era Cenozoica (pelo menos até o final do Eoceno). A partir do Oligoceno, entretanto, a temperatura média começou a diminuir, primeiro mais lentamente, e com amplas flutuações, depois de modo mais acelerado a partir do início do Pleistoceno (2 Ma). No começo do Oligoceno (32 Ma), a Terra esfriou por curtíssimo espaço de tempo, causando grande queda do nível do mar, e pela primeira vez, geleiras permanentes se formaram na Antártica. Nos mares, a microfauna foi bastante afetada, e na Patagônia, onde este evento climático coincidiu com o soerguimento andino, houve o desaparecimento das floras tropicais e a diminuição das espécies subtropicais.

Há 1,5 Ma a calota polar ártica era imensa, encobria cerca de dois terços da América do Norte, toda a Groenlândia e o norte da Europa e Sibéria. Os continentes do hemisfério sul, à exceção da Antártica, foram menos atingidos que os do norte, tendo a calota polar sul se expandido sobre o Atlântico Sul, Na América do Sul, Terra do Fogo, Patagônia e metade sul da cadeia andina foram duramente atingidas. Vestígios de antigas geleiras são encontrados em todas estas regiões. Na Terra do Fogo, o canal de Beagle e o estreito de Magalhães são vales escavados por gigantescas geleiras que se dirigiam ao oceano durante o máximo avanço do gelo (entre 35 e 18 mil anos). Neste tempo, o volume de gelo sobre os continentes foi tão grande que o nível do mar encontrava-se entre 120 e 130m mais baixo do que hoje, expondo as plataformas continentais²³. O rebaixamento do nível do mar terminou com o isolamento da porção norte da América do Sul e a partir de uma ponte de terras emersas (América Central) passou a ocorrerem trocas faunísticas entre as Américas do Norte e do Sul. Para a América do Sul, a invasão denotou significativa substituição da fauna de mamíferos, hoje composta em grande parte por elementos imigrados. A era glacial ocasionou a redução da área de florestas tropicais do mundo inteiro. Na Amazônia, acredita-se que grande parte da floresta foi alterada para savana por longos períodos, restando apenas núcleos de floresta (ilhas) em

setores mais úmidos. A floresta foi gradativamente reconstituída a partir do término da era glacial (entre 18 e 15 mil anos)²⁴.

Considerações Finais

Vivemos em um mundo sob constante transformação, onde a mudança contínua elimina, em termos de tempo geológico, qualquer possibilidade de estabilidade. A mudança pode ocorrer de modo lento, na escala de milhões de anos; pode ser abrupta, envolvendo milhares de anos, ou mesmo instantânea, quando se relaciona aos eventos episódicos, como a queda do grande meteoro que levou os dinossauros à extinção. A contínua movimentação dos continentes por diferentes latitudes gera alterações climáticas de longo prazo, lentas e graduais, porém muitas vezes produzindo condições críticas ou mesmo inóspitas (por exemplo, formação da Pangeia; posição atual da Antártica no polo sul). As eras glaciais são disparadas em curto intervalo de tempo e em poucos milhares de anos o nível do mar pode baixar mais de uma centena de metros. Uma glaciação afeta não só as terras localizadas nas latitudes altas, mas também as das faixas equatoriais, pois diminui a capacidade dos continentes em reter umidade, por vezes ressecando extensas áreas. Ao contrário, épocas de grande atividade vulcânica geram efeito estufa ampliado, que derrete o gelo polar e inunda as terras baixas sobre os continentes, propiciando, muitas vezes, o grande desenvolvimento de florestas (em razão de maior umidade e CO₂ aumentado). Erupções vulcânicas catastróficas podem jogar grandes volumes de cinza na atmosfera superior, bloqueando a radiação solar e gerando, instantaneamente, frio glacial por vários anos, até que a atmosfera fique outra vez transparente à luz solar.

A América do Sul, nos últimos 250 Ma, passou por muitas transformações. Experimentou grandes alterações desde sua existência não individualizada no interior, primeiro da Pangeia e depois em Gondwana, em seguida constituindo um continente junto com a África, até finalmente se tornar um continente.

O vulcanismo foi um elemento importante da história geológica do continente, localizado primeiro no bordo oeste, no início da era mesozoica, depois no bordo leste ao final desta era e novamente no bordo oeste com a elevação da cadeia andina durante a era cenozoica. Neste jogo da tectônica de ruptura, que provocou a separação da África, e o consequente tensionamento no bordo oeste, o continente teve sua declividade alterada, produzindo diversos fenômenos, entre eles a inversão

no curso da drenagem (primeiro para oeste e depois para leste) e o sentido das invasões marinhas (do Pacífico no início, depois do Atlântico).

Embora tenha migrado muito pouco em termos latitudinais (seu principal movimento é para oeste), o continente passou por grandes alterações climáticas. Desertificação nas baixas latitudes e condições mais úmidas e mesmo florestas nas latitudes médias e altas foram situações comuns na América do Sul ao longo da era Mesozoica. A separação da África e a elevação dos Andes modificaram esta tendência, e hoje temos, na região norte, umidade e floresta na parte central e aridez no lado do Oceano Pacífico, enquanto na região sul, acima dos 30° S, ocorre o inverso, com umidade no bordo oeste e aridez na Patagônia argentina. Durante os últimos 5 milhões de anos, a Terra do Fogo e a Patagônia foram ocupadas pelo gelo, mas a Amazônia também foi muito afetada, com expansão da savana e grande retração da área florestada.

A evolução da vida na Terra está relacionada aos eventos geológicos. Durante as grandes crises, a vida sofre redução de diversidade, mas depois, sob novas condições, segue adiante e se expande. Grupos orgânicos surgem, podem inclusive ser favorecidos por uma crise que afeta aos demais, porém desaparecem em algum momento. Seguindo o processo natural, nos próximos milhões de anos, os continentes continuarão em movimento, ocorrerão novos eventos vulcânicos e, como consequência, mudanças climáticas serão decisivas para o surgimento e a extinção de segmentos da vida na Terra²⁶.

Agradecimentos

Aos professores Wilson Wildner e Cristianini Trescasto Bergue, pelas discussões sobre os diversos eventos ocorridos na América do Sul. À professora Tânia Dutra, pela revisão crítica do original e pelo auxílio na compreensão da evolução da flora sul-americana.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. DOTT, R. H.; BATTEN, R. L. *Evolution of the Earth*. 4. ed. New York: McGraw-Hill Book, 1988. 555p.
2. HALLAM, A. A. Review of Mesozoic climates. *Journal of the Geological Society* (London), v.142, p. 433-445, 1985.
3. DE WIT, M. J.; BRITO NEVES, B. B.; TROUW R. A. J. et al. Pre-Cenozoic correlations across the South Atlantic region: "the ties that bind". In: PANKHURST, R. J.; TROUW, R. A. J.; BRITO NEVES, B. B. et al. *West Gondwana: Pre-cenozoic Correlations Across the South Atlantic Region*. Geological Society, London: Special Publications, 2008. cap. 1, p. 1-8.
4. PARRISH, J. T. Climate of the supercontinent Pangea. *Journal of Geology*, v. 101, p. 215-233, 1993.

5. MOHRIAK, W.; NEMCOK, M.; ENCISO, G. South Atlantic divergent margin evolution: rift-border uplift and salt tectonics in the basins of SE Brazil. In: PANKHURST, R. J.; TROUW, R. A. J.; BRITO NEVES, B. B. et al. *West Gondwana: Pre-cenozoic Correlations Across the South Atlantic Region*. Geological Society, London: Special Publications, 2008. cap. 19, p. 365-398.
6. ORNE, A. R. The tectonic framework of South America. In: VEBLEN, T. T.; YOUNG, K. R.; ORNE, A. R. *The Physical Geography of South America*. Oxford: Oxford Press, 2007. cap. 2, p. 3-22.
7. ARTHAUD, M. H.; CABY, R.; FUCK, R. A. et al. Geology of the northern Borborema Province, NE Brazil and its correlation with Nigeria, NW Africa. In: PANKHURST, R. J.; TROUW, R. A. J.; BRITO NEVES, B. B. et al. *West Gondwana: Pre-cenozoic Correlations Across the South Atlantic Region*. Geological Society, London: Special Publications, 2008. p. 49-67.
8. NEVES, S. P. *Dinâmica do Manto e Deformação Continental*. 2. ed. Recife: Universitária, UFPE, 2008. 168p.
9. MAPES, R. W.; NOGUEIRA, A. C. R.; COLEMAN, D. S. et al. Evidence for a continent scale drainage inversion in the Amazon Basin since the Late Cretaceous. *Philadelphia Annual Meeting* (Pennsylvania), GSA, paper n. 214-3, 2006.
10. ASSINE, M. L. A bacia sedimentar do Pantanal Mato-Grossense. In: MATESSO-NETO, V.; BARTORELLI, A.; CARNEIRO, C. R. et al. *Geologia do Continente Sul-americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. 1. ed., São Paulo: Beca, 2004. cap. 4, p. 61-74.
11. WEBB, S. D. Biological implications of the Middle Miocene Amazon seaway. *Science*, v. 269, p. 361-362, 1995.
12. WILDNER, W.; SANTOS J. O. S.; HARTMANN, L. A. et al. Clímax final do vulcanismo Serra Geral em 135 Ma: primeiras idades U-Pb em zircão. In: XLIII CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 2006. Aracaju. *Anais do XLIII Congresso Brasileiro de Geologia*. Aracaju: SBG, 2008. CD ROM AO-480, p. 126.
13. BRECHLEY, P. J.; HAERPER, D. A. T. *Palaecology: ecosystems, environments and evolution*. 1. ed. Londres: Chapman & Hall, 1998. 402p.
14. BENTON, M. J. Mass extinction, biotic and abiotic. In: NIERENBERG, W. A. *Encyclopedia of Environmental Biology*. San Diego: Academic Press, 1995. v. 2, p. 523-534.
15. LAVINA, E. L. A geologia e o processo histórico (ou, sobre como se constrói um passado a marteladas). *Gaea*, v. 2, n. 1, p. 29-39, 2006.
16. WILLIS, K. J.; MCELWAIN, J. C. *The Evolution of Plants*. 1. ed. New York: Oxford University Press, 2002. 378p.
17. DUTRA, T. L.; STRANS, A. História das Araucariaceae: a contribuição dos fósseis para o entendimento das adaptações modernas da família no hemisfério sul, com vistas ao seu manejo e conservação. In: RONCHI, L. H.; COELHO, O. G. (eds.). *Tecnologia, Diagnóstico e Planejamento Ambiental*. São Leopoldo: Unisinos, 2003. p. 293-351.
18. ALVAREZ, W. T. *rex and the Crater of Doom*. 1. ed. New Jersey: Princeton University Press, 1997. 185p.
19. STANLEY, S. M. *Earth System History*. 1. ed. New York: Freeman and Company, 1998. 615p.
20. LEVIN, H. *The Earth Through Time*. 8. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2006. 547p.
21. KENNETT, J. P.; STOTT, L. D. Abrupt deep-sea warming, palaeoceanographic changes and benthic extinctions at the end of the Palaeocene. *Nature*, v. 353, p. 225-229, 1991.
22. CARTELLE, C. Pleistocene mammals of the cerrado and caatinga of Brazil. In: EISENBERG, J. F.; REDFORD, K. H. *Mammals of the Neotropics: the central neotropics*. Chicago: University of Chicago Press, 1999. p. 27-46.
23. SUGUIO, K.; ANGULO, R. J.; CARVALHO, A. M. et al. Paleonféis do mar e paleolinhas da costa. In: SOUZA, C. R. G.; SUGUIO, K.; OLIVEIRA, A. M. S. et al. *Quaternário do Brasil*. 1. ed. Ribeirão Preto: Holos, 2005. cap. 6, p. 114-129.
24. HAFFER, J. Ciclos de tempo e indicadores de tempos na história da Amazônia. *Estudos Avançados*, v. 6, p. 7-39, 1992.
25. HAQ, B. U. *The Geological Time Table*. 6. ed. Amsterdam: Elsevier, 2007.
26. SCOTESE, C. R. PALEOMAP Project. Disponível em: <http://www.scotese.com/earth.htm>. Acesso em: 07/01/2010.