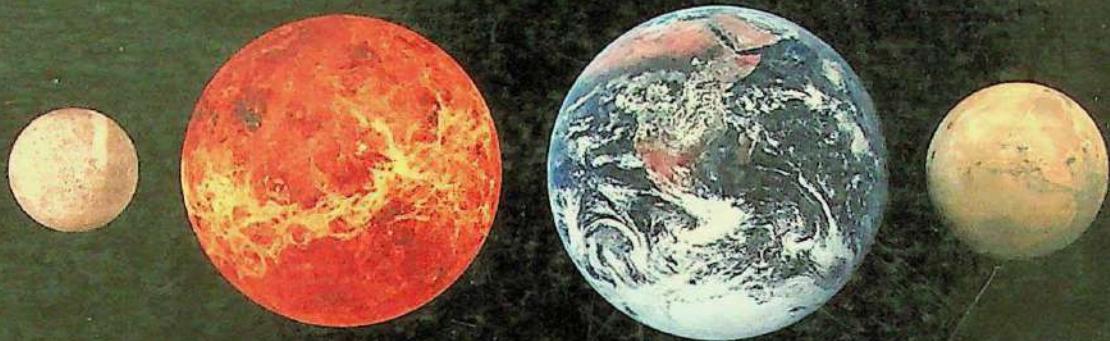




44º CONGRESSO
BRASILEIRO DE GEOLOGIA
O PLANETA TERRA EM NOSSAS MÃOS



As Ciências da Terra e sua importância para a Humanidade

A Contribuição Brasileira para o Ano Internacional do Planeta Terra - AIPT



Rômulo Machado

Editor | Organizador

2008

AS CIÊNCIAS DA TERRA E SUA IMPORTÂNCIA PARA A HUMANIDADE

A contribuição brasileira para o Ano Internacional do Planeta Terra - AIPT

Organizador e Editor:

Rômulo Machado

1^a. edição

Editora

Sociedade Brasileira de Geologia

Rua do Lago 562 - Cidade Universitária

São Paulo - SP - CEP 05508-080 - Brasil – Tel (11) 3812-6166

Curitiba – 2008

Copyright © Rômulo Machado

Projeto de Capa: Thelma Samara

Organizador e Editor: Rômulo Machado

Editoração eletrônica: Daniel Lopes

Impresso na gráfica Capital, Curitiba, PR

Imagens de capa: Maior- NASA (Planetas); Menores- GOES 12

Satellite, NASA e NOAA (Furacão Hurricane Katrina – no centro); Rômulo

Machado (Minas de Cobre do Camaquá, RS – à esquerda, e Dunas de Natal, RN – à direita)

Ficha Catalográfica

As Ciências da Terra e sua importância para a Humanidade *A contribuição brasileira para o Ano Internacional do Planeta Terra-AIPT/*

Organizador e Editor: Rômulo Machado, São Paulo, Sociedade Brasileira de Geologia, Livros Textos, 2008.

140p.; 141 il.; 21 x 29 cm

Obra organizada para o 44 Congresso Brasileiro de Geologia, em Curitiba, PR, em comemoração ao Ano Internacional do Planeta Terra-AIPT.

ISBN.- 978-85-99198-08-7

Inclui bibliografia

1. Ciências da Terra – contribuição brasileira ao AIPT. 2. Geologia – divulgação dos temas do AIPT. 3. Água Subterrânea. 4. Desastres Naturais. 5. Geologia Médica. 6. Megacidades. 7. Interior da Terra. 8. Solo e Ambiente. 9. Terra e Vida. I. Rômulo Machado. II. Sociedade Brasileira de Geologia. III. Livros textos.

1ª. Edição Curitiba – 2008

Tiragem- 3500 exemplares

Sociedade Brasileira de Geologia

Rua do Lago 562 - Cidade Universitária

São Paulo - SP - CEP 05508-080 - Brasil - Tel (11) 3812-6166

Site: www.sbgeo.org.br Email: sbgeol@ndata.com.br

SUMÁRIO

Apresentação	Rômulo Machado	05
Por que necessitamos de um Ano Internacional do Planeta Terra?	Carlos Oiti Berbert	07
Água subterrânea	Everton de Oliveira & João Carlos Simanke de Souza	13
Desastres naturais: situação mundial e brasileira	Eduardo Soares de Macedo, Fabrício Araujo Mirandola, Marcelo Fischer Gramani & Agostinho Tadashi Ogura	35
Geologia médica: por um ambiente mais seguro	Bernardino Ribeiro Figueiredo	49
O futuro dos recursos não-renováveis: energia e sustentabilidade	Saul B. Suslick	61
A emergência da tecnourbesfera e os novos desafios da geologia urbana	Rualdo Menegat	75
O interior da Terra: características e implicações na dinâmica do planeta	Umberto Giuseppe Cordani e Colombo Celso Gaeta Tassinari	93
Solo e ambiente	Adolpho José Melfi e Célia Regina Montes	107
Terra e vida	Kenitiro Suguio, William Sallun Filho & Alethaea Ernandes Martins Sallun	127

APRESENTAÇÃO

Este livro tem por objetivo divulgar junto à comunidade geológica brasileira e ao público em geral os temas considerados prioritários pela ONU, no âmbito da celebração do Ano Internacional do Planeta Terra – AIPT, ano que coincide com a realização do 44º Congresso Brasileiro de Geologia em Curitiba, PR.

A idéia de organizar este livro surgiu em uma reunião realizada em Curitiba na Secretaria de Educação do Estado do Paraná, em março de 2008, que contou com a presença do Presidente da Comissão Organizadora do referido congresso, o geólogo Eduardo Salamuni, com o objetivo de discutir um curso para professores da rede pública do Estado do Paraná sobre os temas do AIPT, a ser ministrado durante o evento.

Vimos, então, a possibilidade de produzir um livro em português sobre o AIPT, preparado por especialistas brasileiros, que além de representar a contribuição da Sociedade Brasileira de Geologia para a divulgação do programa no Brasil, pudesse ainda ser distribuído para todos os participantes do congresso e servisse ao mesmo tempo como fonte de material didático para os professores que participarão do curso e ao público em geral.

O livro encontra-se organizado em nove capítulos, a saber: 1. Por que necessitamos de um Ano Internacional do Planeta Terra?; 2. Água Subterrânea – conservação e gerenciamento; 3. Desastres Naturais: a situação mundial e brasileira; 4. Geologia Médica: por um ambiente mais seguro; 5. O Futuro dos Recursos Não-Renováveis: energia e sustentabilidade; 6. A emergência da Tecnourbesfera e os novos desafios da Geologia Urbana; 7. O interior da Terra: características e implicações na dinâmica do Planeta; 8. Solo e Ambiente; 9. Terra e Vida.

Estamos confiantes que o Ano Internacional do Planeta Terra será uma grande oportunidade para divulgar junto à sociedade o potencial das Ciências da Terra para a construção de um mundo sustentável e seguro para as próximas gerações, deixando claro que os cientistas da Terra são profissionais capazes de conduzir a exploração dos recursos naturais (água subterrânea, solos agrícolas, petróleo, gás natural, jazidas minerais etc.) de forma racional e sustentável sem quebrar o frágil equilíbrio existente no planeta, bem como de fornecer os instrumentos necessários para a prevenção e redução dos desastres naturais, de atuar no gerenciamento das megacidades, de investigar os fenômenos relacionados com as mudanças globais e estudar as relações entre a geologia e a saúde humana e os demais seres vivos (Geomedicina).

Na certeza da importância desta obra para a divulgação dos temas relacionados com o Ano Internacional do Planeta Terra, transmitimos aqui nossas congratulações e gratidão aos autores pela sua inestimável contribuição ao desenvolvimento das Ciências da Terra no Brasil.

Rômulo Machado
Geólogo, Professor do Instituto de Geociências da USP
ex-presidente da Sociedade Brasileira de Geologia

Por que necessitamos de um Ano Internacional do Planeta Terra?

Carlos Oiti Berbert

*Coordenador—Geral das Unidades de Pesquisa do MCT
Conselheiro Sênior para o AIPT junto à IUGS e UNESCO*

Por que necessitamos de um Ano Internacional do Planeta Terra?

Carlos Oiti Berbert

Resumo O Ano Internacional do Planeta Terra, idealizado durante o Congresso Internacional de Geologia do Rio de Janeiro em 2000 e Proclamado pela ONU para ocorrer no triênio 2007-2008-2009, tem por objetivos principais demonstrar o grande potencial das Ciências da Terra na construção de uma sociedade mais segura, saudável e sustentada e encorajar essa mesma sociedade a aplicar esse potencial mais eficientemente, em seu próprio benefício. Para atingi-los, suas atividades estão concentradas em dois grandes focos – Ciência e Divulgação – e em dez temas considerados prioritários por aquela Organização: água subterrânea, (mega)cidades, clima, crosta e núcleo terrestres, desastres naturais, oceanos, recursos naturais (minerais e energia), solos, Terra e saúde e Terra e vida. O foco científico procura motivar pesquisadores e tecnologistas das diversas áreas a desenvolverem projetos e encontrarem soluções para os problemas que o Planeta já vem e continuará a enfrentar neste século, relacionados a esses temas, enquanto o foco da divulgação visa, em linhas gerais, disseminar o conhecimento geocientífico em linguagem apropriada ao entendimento da sociedade, da classe política e da mídia, sobre a importância das Ciências da Terra para o seu dia-a-dia, resgatando, em grande parte, o que as inúmeras Comissões, Cúpulas, Encontros, Reuniões de Chefes de Estado realizadas sobre o meio ambiente não conseguiram desde 1972.

Palavras-chave: Planeta Terra - Ano Internacional - ONU - UNESCO

Abstract *WHY DO WE NEED AN INTERNATIONAL YEAR OF PLANET EARTH.* The International Year of Planet Earth, idealized during the International Geological Congress in Rio de Janeiro 2000, and Proclaimed by the United Nations Organization for the triennium 2007-2008-2009, has as main objectives to demonstrate the great potential of the Earth Sciences in the construction of a safer, healthier and sustainable society and to encourage this society to apply this potential more efficiently for its own benefit. To reach these objectives, the IYPE activities are concentrated in two main focus – Science and Outreach – and in ten themes considered priorities by UN: groundwater, (mega)cities, climate, Earth crust and nucleus, hazards, oceans, natural resources (minerals and energy), soils, Earth and health and Earth and life. The scientific focus intends to stimulate researchers and engineers from different areas of knowledge to develop projects and find solutions for the problems that the Planet is and will continue to experience during this century, related to those themes, while the outreach focus aims at disseminating the geoscientific knowledge in a proper language for society, politicians and decision makers understanding about the importance of Earth Sciences for their lives, recovering most of what the innumerable State authorities' Commissions and Meetings realized about environment did not reach since 1972.

Keywords: Planet Earth - International Year - UN - UNESCO

INTRODUÇÃO “Por que necessitamos de um Ano Internacional do Planeta Terra?”. Essa foi a pergunta que passou pela cabeça de muitos dos integrantes do Conselho da União Internacional de Ciências Geológicas - IUGS em sua reunião durante o 31º Congresso Internacional de Geologia, realizado no Rio de Janeiro, em 2000, quando seu então Presidente, Eduardo de Mulder, colocou o assunto em discussão.

Para bem entender essa necessidade, há que se recordar que, apesar de algumas manifestações esparsas de indivíduos e pequenos grupos, o homem só começou a se preocupar oficialmente com o Planeta Terra em 1972, em Estocolmo, Suécia, quando foi organizada a Conferência da ONU sobre Desenvolvimento Humano e Meio Ambiente, da qual resultaram a primeira Declaração Universal abrangendo as questões ambientais e o envolvimento da espécie humana, e o Programa para o Meio Ambiente daquela Organização.

Onze anos mais tarde surgiu a Comissão Mundial do Meio Ambiente, seguido do primeiro Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas – PIMC (ou IPCC)

(1988), da Conferência sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável – Rio 92, da Cúpula Mundial da ONU sobre Desenvolvimento – Rio mais 10, de Johannesburg, da Conferência de Kyoto sobre Mudanças Climáticas (1997) e do novo PIMC (2006-2007), que lançou as graves perspectivas para o nosso planeta ainda neste caso decorrentes do previsto “aquecimento global”.

A idéia de Ed Mulder baseava-se no desconhecimento que a sociedade tem da importância das geociências e dos geocientistas para o dia-a-dia na vida das pessoas, deixando, por isso, de valorizar e melhor aproveitar o que elas lhe oferecem e como eles contribuem para o bem estar da população.

De fato, a partir de 1972, inúmeras outras Conferências, Congressos, Seminários, Reuniões de Chefes de Estado, passeatas, Encontros mundiais e locais, foram realizados envolvendo, direta ou indiretamente, questões ambientais, mas raramente seus resultados alcançaram as pessoas, quer pelo caráter e linguagem política ou diplomática de suas organizações, quer pelas dimensões regionais e locais, sem grande repercussão na mídia. A bem da

verdade, apenas o Relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas de 2006/2007 teve um alcance e um impacto maior junto à sociedade, graças à divulgação intensa de seus resultados catastrofistas.

Aprovada a idéia de Mulder no Conselho da IUGS, passou-se a disseminá-la entre os países aderentes à UNESCO, em cuja Assembléia Geral de outubro de 2005 foi ela aprovada por unanimidade, sendo levada, a seguir, à Assembléia Geral da Organização das Nações Unidas, de dezembro, onde foi apresentada como moção pela Tanzânia e contou com o apoio irrestrito de 191 nações. Estava assim Declarado 2008 como o Ano Internacional do Planeta Terra, e como quase todos os Anos Internacionais da ONU, cobrindo o triênio 2007-2008-2009. (Berbert, 2007)

Apenas para ilustrar a importância do AIPT, para que uma determinada data seja consagrada pela ONU como um Ano Internacional, é necessário que sejam preenchidos os seguintes requisitos básicos: 1. prioridade a diretrizes políticas, sociais, econômicas, culturais, humanitárias ou humanas; 2. impacto em todos (ou na maioria) dos países, independentemente de seus sistemas econômicos ou sociais; 3. contribuição ao desenvolvimento da cooperação internacional na solução de problemas globais; 4. interesse especial para os países em desenvolvimento.

O Ano e seus Objetivos Segundo a Organização das Nações Unidas, o Ano Internacional do Planeta Terra tem dois grandes objetivos gerais:

- Demonstrar o grande potencial das Ciências da Terra na construção de uma sociedade mais segura, saudável e sustentada;
- Encorajar a sociedade a aplicar esse potencial mais eficientemente, em seu próprio benefício.

Como objetivos específicos, o AIPT pretende contribuir para:

- a redução dos riscos dos desastres naturais (ou induzidos) através do conhecimento existente ou adquirido;
- a redução dos problemas de saúde das populações através do entendimento dos aspectos médicos das Ciências da Terra;
- a inovação na descoberta de recursos naturais, aproveitando-os de maneira sustentada;
- a construção de edificações e expansão urbana mais seguras usando condições naturais subterrâneas;
- a determinação dos fatores não-humanos nas mudanças climáticas;
- a inovação do conhecimento sobre a ocorrência de recursos naturais (como a água subterrânea, os depósitos minerais e energéticos), que são fontes potenciais de tensões políticas entre as nações;

- o incentivo ao conhecimento das condições especiais dos fundos oceânicos relevantes para a evolução da vida.

Esses objetivos levaram à concentração dos esforços em dois grandes focos para o AIPT: **Ciência e Divulgação** e em dez temas considerados, pela ONU, como prioritários entre aqueles que mais influenciam e influenciarão a vida dos cidadãos comuns neste século: **Água Subterrânea, (Mega) cidades, Clima, Crosta e Núcleo Terrestres, Desastres Naturais, Oceanos, Recursos Naturais (Minerais e Energia), Solos, Terra e Saúde e Terra e Vida.** (Nield *et al.*, 2005)

São nesses dez temas que se vem, desde janeiro de 2007, no âmbito do AIPT e em todo o mundo, procurando incentivar o desenvolvimento científico e tecnológico para a solução dos problemas que já afetam e afetarão a humanidade.

O foco **Divulgação** assume papel fundamental junto a governantes, políticos e formadores de opinião, na medida em que são eles que disseminarão o conhecimento e tomarão as decisões para a implementação das medidas necessárias para minimizar ou eliminar os problemas. Um ponto crítico aqui é o estímulo junto aos governantes para a inserção das geociências nos sistemas educacionais em todos os níveis.

O foco **Científico** procura chamar a atenção de pesquisadores, engenheiros, tecnólogos para o caráter social de seus trabalhos. Em outras palavras, o direcionamento (ou redirecionamento) de suas pesquisas e obras “para o olhar e necessidades da sociedade”.

Problemas relacionados aos temas prioritários Os dez temas considerados prioritários pela ONU, no contexto do Ano Internacional do Planeta Terra, são fruto de intensas reflexões e longas discussões de mais de duas dúzias de cientistas de renome mundial reunidos ainda em 2005, que levantaram diversos problemas a eles relacionados e que necessitam de soluções urgentes. Como os que seguem abaixo, sem esgotar totalmente a lista logicamente:

ÁGUA SUBTERRÂNEA É sabido que as águas subterrâneas serão, no futuro, os mananciais mais seguros para o abastecimento humano em todos os sentidos (consumo domiciliar, saúde, agricultura, indústria etc)

No entanto, ainda não se sabe bem ao certo qual o seu volume e quanto dele pode ser utilizado de maneira sustentada; como pode ser identificada e gerenciada a exploração das reservas de água “fóssil” de sorte a se minimizarem a depleção e as consequências de eventuais desastres ecológicos; e nem como podem os recursos subterrâneos ser protegidos da poluição e, se poluídos, como podem ser recuperados. Para apenas citar alguns dos problemas que envolvem as águas subterrâneas. (MMA, 2001; Struckmeir *et al.*, 2006)

(MEGA)CIDADES As megacidades são consideradas metrópoles com mais de 5 milhões de habitantes. Hoje são cerca de 50 no mundo, e chegarão em 2025 a mais de 60. Basta apenas observar o que acontece com o trânsito,

fornecimento de energia e abastecimento de água, alimentos, materiais de construção em cidades como São Paulo e Rio de Janeiro nos dias de hoje, para se imaginar o quadro mais que preocupante que se antevê dentro de 30 ou 40 anos, aqui e em várias partes do mundo.

É preciso urgentemente se estudar, por exemplo, como as práticas de planejamento, construção, manutenção e gerenciamento nas grandes cidades poderão reduzir os riscos ecológicos; de que maneira a sustentabilidade e qualidade de vida dos habitantes das megacidades podem ser incrementadas e como podem os riscos ser diminuídos; como se poderá assegurar a localização e construção de obras superficiais e subterrâneas cada vez maiores em benefício e sem risco para as populações dessas cidades; como se pode ter políticas de longo prazo que harmonizem as demandas econômicas, sociais e ambientais nesses grandes conglomerados; como convencer os governantes a estabelecerem e praticarem o zoneamento econômico-ecológico nas regiões que envolvem tais cidades. (Krass *et al*, 2005)

CLIMA Nesse tema, é preciso que se identifiquem a freqüência e as causas dos eventos extremos nos registros geológicos e se entenda melhor as variações das temperaturas tropicais e sua interação com as variações climáticas em zonas temperadas, por exemplo.

É preciso, ainda, que se promovam estudos paleoambientais onde existam bons jazigos arqueológicos, especialmente onde aconteceram mudanças climáticas; que se executem pesquisas biológicas, geológicas, pedológicas e oceanográficas para se identificar a relação entre clima e mudanças de sistemas; se identifiquem mais detalhadamente as regiões de subsidência e elevação, em função do aumento esperado do nível dos oceanos. Até mesmo no assunto das mudanças climáticas é necessário que se tenha uma definição melhor de como se darão (e se darão realmente, segundo uma corrente contrária à hipótese formulada pelo PIMC). (Dodson *et al*, 2004)

CROSTA E NÚCLEO TERRESTRES O conhecimento geológico da Terra tem experimentado enorme salto nos últimos anos, graças ao emprego de avançados métodos e equipamentos de investigação e a interação maior entre os pesquisadores de todo o mundo.

Porém, ainda restam muitas questões a ser respondidas, entre elas duas fundamentais: a melhor compreensão da transferência de massa da superfície terrestre e sua relação com a reciclagem profunda de material da Terra, e o melhor entendimento sobre os processos geológicos que podem melhorar as nossas previsões sobre desastres naturais, como os terremotos, por exemplo. (Cloeting *et al*, 2004)

DESASTRES NATURAIS Este é, dentre os dez temas, o que maior influência tem nas populações e na consciência dos políticos e governantes, pelas suas consequências imediatas na vida das pessoas (em particular dos eleitos, é claro).

É aqui preciso saber, entre outros elementos, como os homens vêm alterando a geosfera, a biosfera e a geomorfologia, contribuindo para o incremento de certos desastres

naturais e aumentando a sua vulnerabilidade perante eles.

É preciso desenvolver tecnologias e metodologias em diversas escalas espaciais para diminuir a vulnerabilidade de pessoas e lugares a desastres naturais.

É necessário desvendar como o nosso atual conhecimento pode monitorar, predizer e minimizar as variações de um grande desastre natural para outro e criar novas técnicas de proteção local e global. (Beer *et al*, 2004)

OCEANOS Cobrindo a maior porção da Terra, os oceanos são também a maior lixeira do planeta, constituindo-se, também, em um de seus pilares econômicos e de lazer, além de representarem uma possível ameaça para alguns países e cidades, caso se concretizem as previsões de sua elevação, em função das mudanças climáticas.

Além das questões ambientais, sociais e econômicas relacionadas aos oceanos, outras, de caráter científico, carecem de resolução, como a real interação da litosfera, hidrosfera e biosfera nas cadeias mesoceânicas e seu papel na origem da vida na Terra.

Ou, que processos terrestres afetam a formação e evolução das margens continentais, e que benefícios e ameaças oferecem essas margens para a humanidade. (Chen *et al*, 2005)

SOLOS Para a biodiversidade, e o homem em particular, os solos, ao lado da água, constituem na maior fonte de vida e, apesar disso, são, também como a água, a porção terrestre mais desgastada e poluída em grande parte do globo terrestre. É dos solos que saem nossos alimentos e é neles que se fazem as trocas iônicas com a atmosfera, que permitem a renovação de bactérias e de organismos menores que, por sua vez, vão regenerá-los. (Dent *et al*, 2005)

Com uma população estimada em 11,2 bilhões de habitantes ao final deste século, os solos aumentarão cada vez mais de importância e se não forem acelerados os estudos e as medidas para melhor aproveitá-los, certamente deixarão de contribuir para minimizar o problema da fome no planeta.

Assim, urge responder questões como as seguintes, entre outras: onde se poderá expandir a base do conhecimento dos solos para o maior benefício da sociedade e do meio-ambiente?; como podemos associar a base da ciência dos solos com as diversas disciplinas das Ciências da Terra?; como podemos nos comunicar melhor com a sociedade para melhor aproveitamento e conservação dos solos?; como podemos maximizar o uso do conhecimento sobre solos naturais?; como podemos introduzir novas tecnologias de produção de alimentos, de forma sustentada em países em desenvolvimento da África, da Ásia e da América Latina?

Recursos Naturais (Minerais e Energia) Não existe praticamente nada na face da Terra, natural ou construído pelo homem, que não tenha a participação de bens minerais, cuja influência é decisiva (além do ar que respiramos e do clima que experimentamos) para a vida de todos os seres. No entanto, isso é quase invisível para a sociedade, pela falta de conhecimento adequado. Desse desconhecimento advêm muito do desperdício observado e muitas

das críticas à exploração mineral por parte de ambientalistas (ou pseudoambientalistas) desavisados.

E imprescindível que se estabeleçam campanhas de esclarecimento e que se conscientize os profissionais das geociências para o seu papel na disseminação desse conhecimento.

Ao lado disso, é preciso que se tenham respostas para como poderá o avanço geocientífico e dos recursos minerais e energéticos proporcionar melhor planejamento, governança, estabilidade e avanço para um desenvolvimento sustentado da humanidade?; como pode o crescente uso industrial de recursos minerais e energéticos desenvolver-se através de novas produções sustentadas?; como podem ser aproveitadas as atuais fontes de energia mais utilizadas (petróleo, carvão, hidrelétricas), com menor impacto ambiental e como se poderá lidar, com segurança, com o lixo nuclear proveniente das usinas atômicas? (Sinding-Larsen et al, 2006)

TERRA E SAÚDE Este tema abrange, em essência, o novo ramo das geociências conhecido como Geologia Médica ou Geomedicina, que estuda a influência dos minerais e da água na saúde humana e animal, como forma de correção e prevenção de muitas doenças.

Nesse tema, é preciso identificar as causas ambientais para os problemas de saúde conhecidos e, em colaboração com pesquisadores biomédicos e instituições de saúde pública, encontrar soluções para prevenir ou minimizar esses problemas.

É preciso, também, identificar com segurança “altos” e “baixos” geoquímicos em solos, sedimentos, rochas e água que possam causar impactos diretos ou indiretos à saúde de pessoas, animais e plantas.

É fundamental, ainda, que se estabeleçam cooperações entre países desenvolvidos e em desenvolvimento na busca de soluções comuns para problemas de saúde. (Davies et al, 2005)

TERRA E VIDA Conhecer o passado é fundamental para se entender o presente e prever o futuro. É isso que

pretende o AIPT com esse tema.

Com base no passado do planeta poder-se-á entender, por exemplo, os processos dinâmicos da biosfera e auxiliar na sustentabilidade dos sistemas de vida de nosso planeta. Descobrir como se desenvolveu a vida na Terra e como foram extintos vários biomas e como outros conseguiram sobreviver a grandes desastres e mudanças climáticas durante a sua história, pode nos dar a chave para a própria sobrevivência da humanidade no futuro. (Reichenbacher et al, 2006)

CONCLUSÕES Enfim, cada um dos dez temas traz, em seu bojo, uma série de problemas e questões a serem resolvidas. O Ano Internacional do Planeta Terra Terra pretende chamar a atenção dos geocientistas para a sua responsabilidade na solução desses e outros problemas e questões que afetam e afetarão a vida da sociedade.

Por outro lado, permanece igualmente importante a disseminação do conhecimento geocientífico de maneira clara, transparente, inteligível, menos hermética, para a sociedade, de sorte que essa sociedade compreenda os benefícios que as Ciências da Terra lhe proporcionam no seu dia-a-dia, desde a hora em que as pessoas acordam, se lavam (água, torneiras metálicas), tomam o seu café-da-manhã (alimentos provenientes do solo ou de animais que consomem o que os solos produzem), saem para o trabalho (carros, trens, metrôs) que cruzam ruas ou se deslocam em trilhos e túneis (asfalto, construções civis), sobem em elevadores, sentam em cadeiras de plástico (petróleo), após acenderem as luzes do escritório e ligarem os aparelhos de ar-condicionado (energia), abrem suas caixas de mensagens no computador e atendem ao telefone (metais, minerais), almoçam... jantam... bebem seu drinque (água, alimento, copos de vidro), assistem aos jornais e novelas da televisão (energia, petróleo, vidro, metais, minerais), dormem e, no dia seguinte começam tudo novamente.

Em tudo estão presentes as Ciências da Terra. De seu conhecimento e valorização e dos profissionais que nelas atuam podem resultar o melhor bem-estar e a felicidade das pessoas. E é isso que todos nós procuramos

Referências

- Beer, T., Bobrowsky, P., Canuti, P., Cutter, S. and March, S. Hazards – minimizing risk, maximizing awareness. *Prospectus for a key theme of the International Year of Planet Earth*. Earth Sciences for Society Foundation, Leiden, The Netherlands. 15 p. 2004. www.yearofplanetearth.org.
- Berbert, C.O. – Ciências da Terra para a Sociedade. In *Revisa Iusp*. Coordenadoria de Comunicação da Universidade de São Paulo, n.71. São Paulo. 2007, pp.70-80.
- Brasil. Ministério da Ciência e Tecnologia. SciDev.Net – *Guia de Divulgação Científica*. David Dickson e outros, ed, Brasília: MCT. 2004
- Brasil. Ministério do Meio Ambiente. Ocorrências das águas subterrâneas. IN: *Águas subterrâneas: programa de águas subterrâneas*. Brasília: MMA, 2001.
- Chen, J., Devey, C., Fischer, C., Lin, J., Whitmarsh, B. Ocean – abyss of time. *Prospectus for a key theme of the International Year of Planet Earth*. Earth Sciences for Society Foundation, Leiden, The Netherlands. 12 p. jul 2005. www.yea-rofplanetearth.org.
- Dodson, J., Alverson, K., Daoxian, Y., Wiegand, J., Yim, W. and Nield, T. Climate change – the “stone tape”. *Prospectus for year of planetearth.org*; Cloeting, S., Emmerman, R., Ludden, J., Thybo, H., Zoback, M., and Horvath, F. Deep Earth – from crust to core. *Prospectus for a key theme of the International Year of Planet Earth*. Earth Sciences for Society Foundation. Leiden, The Netherlands. 12 p. ago 2004. www.yearofplanetearth.org.
- Davies, B.E., Bowman, C., Davies, T.C. e Selinus, O. - Medical Geology: Perspectives and Prospects. In : ESSENTIALS OF MEDICAL GEOLOGY: IMPACTS OF THE NATIONAL ENVIRONMENT ON PUBLIC HEALTH. Selinus et al., ed. Elsevier Academic Press, London. 12 p. 2005.
- Dent, D., Hartemink A. And Kimble, J. Soil – Earth’s living skin. *Prospectus for a key theme of the International Year of Planet Earth*. Earth Sciences for Society Foundation, Leiden, The Netherlands. 12 p. set.2005. www.yea-rofplanetearth.org.
- Dodson, J., Alverson, K., Daoxian, Y., Wiegand, J., Yim, W. and Nield, T. Climate change – the “stone tape”. *Prospectus for*

- a key theme of the International Year of Planet Earth. Earth Sciences for Society Foundation, Leiden, The Netherlands.12 p. ago 2004. www.yearofplanetearth.org
- Kraas, F., Aggarval, S., Coy, M., Heiken, G., Mulder, E. de, Marker, B., Nenoen, K. And Yu, W. Megacities – our global urban future. *Prospectus for a key theme of the International Year of Planet Earth*. Earth Sciences for Society Foundation, Leiden, The Netherlands.12 p. dez. 2005. www.yearofplanetearth.org.
- Nield, T., Derbyshire, E., Leenaers, H., and Schalke, H. Planet Earth in our hands. . *Prospectus for a key theme of the International Year of Planet Earth*. Earth Sciences for Society Foundation, Leiden, The Netherlands.12 p. dez 2003. www.yearofplanetearth.org.
- Nield, T., Leenaers, H. and Waal, André Van de. Outreach – bringing Earth Sciences to everyone. . *Prospectus for a key theme of the International Year of Planet Earth*. Earth Sciences for Society Foundation, Leiden, The Netherlands.. 12 p. jan 2005. www.yearofplanetearth.org.
- Reichenbacher, B., Blieck, A., Erwin, D., Piller, W., Sandulescu M. and Talent, J. .Earth and life – origins of diversity. *Prospectus for a key theme of the International Year of Planet Earth*. Earth Sciences for Society Foundation, Leiden, The Netherlands.12 p. jan. 2006. www.yearofplanetearth.org.
- Selinus, O., Centeno, J.A., Finkelman, R.B., Weinstein, P., and Derbyshire, E. Earth and health. *Prospectus for a key theme of the International Year of Planet Earth*. Earth Sciences for Society Foundation, Leiden, The Netherlands.12 p. ago 2004. www.yearofplanetearth.org.
- Sinding-Larsen, R., Hovland, M., Shiield, D. and Gleditsch, N., P. Resource issues – towards sustainable use. . *Prospectus for a key theme of the International Year of Planet Earth*. Earth Sciences for Society Foundation, Leiden, The Netherlands.12 p. fev 2006. www.yearofplanetearth.org
- Struckmeir, W., Rubin, Y. and Jones J.A.A. Groundwater – reservoir for a thirsty planet? *Prospectus for a key theme of the International Year of Planet Earth*. Earth Sciences for Society Foundation, Leiden, The Netherlands.12 p. fev 2006. www.yearofplanetearth.org

Água Subterrânea: conservação e gerenciamento

Everton de Oliveira¹ & João Carlos Simanke de Souza²

1 - Av. São Camilo 476, Cotia, São Paulo, SP, 06709-150, 11 4612-0480, everton@hidroplan.com.br

2 - Rua Agapanos, 154 Buga III, 11750-000 Peruibe, jsimanke@terra.com.br

Água subterrânea: conservação e gerenciamento

Everton de Oliveira & João Carlos Simanke de Souza

Resumo O AIPT tem o mérito de ser uma iniciativa envolvente para atingir as necessidades de uma sociedade em transformação constante e ávida por conhecimentos. A abordagem por temas relevantes visa alertar os tomadores de decisão quanto ao desafio de gerenciar aspectos técnicos, sociais, éticos e políticos do uso sustentável dos vários bens legados pela natureza ao homem. Desde os anos 70 com a criação do Programa Hidrológico Internacional - IHP pela Unesco há um foco particular na hidrogeologia e os estudos relacionados à água subterrânea. O uso racional e sustentável da água subterrânea é uma aspiração do planeta e por consequência de todos os seres vivos neste Ano Internacional do Planeta Terra. Para uma boa prática dos usos pretendidos é necessário enfocar o bem estar da humanidade, considerando nosso antropocentrismo, praticando a conservação e o gerenciamento da água subterrânea.

Palavras-chave: Águas Subterrâneas: Conservação e Gerenciamento.

Abstract GROUNDWATER: CONSERVATION AND MANAGEMENT. This article is a resume of many official publications about groundwater occurrences in Brazil. The event AIPT was so proud to fulfill and provide regional information making easy the knowledge and divulgation from geologic sciences around the world. From the hydrologic cycle to many particular features from Brazil we have the description from hydrogeologic potential from the main aquifers, technical descriptions, sustainable development and groundwater management.

Keywords: Groundwater, groundwater management, conservation.

DISTRIBUIÇÃO E DISPONIBILIDADE DE ÁGUA MUNDIAL

A maior parte da superfície da Terra está coberta por água (70%), por isso a chamamos de Planeta Azul. Do volume total de água do planeta, 97,5% é salgada, compondo os mares e oceanos, e apenas 2,5% é doce. Porém, da água doce existente na Terra, 68,9% formam as calotas polares, geleiras e neves eternas (que cobrem os cumes das montanhas), 0,9% corresponde à umidade do solo e pântanos, 0,3% aos rios e lagos, e os 29,9% restantes são águas subterrâneas. Desta maneira, do total de água doce disponível para consumo, descontando-se aquela presente nas calotas polares, geleiras e neves eternas, as águas subterrâneas representam um total de 96%, conforme apresentado na Figura 1 e Tabela 1.

CICLO HIDROLÓGICO Devido às diferentes e particulares condições climáticas, em nosso planeta a água pode ser encontrada, em seus vários estados: sólido, líquido e gasoso. O ciclo hidrológico, ou ciclo da água, é o movimento contínuo da água presente nos oceanos, continentes (superfície, solo e rocha) e na atmosfera (Figura 2).

Esse movimento é alimentado pela força da gravidade e pela energia do Sol, que provocam a evaporação das águas dos oceanos e dos continentes. A permanente mudança de estado físico da água, isto é, o ciclo hidrológico, é a base da existência da erosão da superfície terrestre.

Não fossem as forças tectônicas, que agem no sentido de criar montanhas, hoje a Terra seria um planeta uniformemente recoberto por uma camada de 3 km de água salgada. Em seu incessante movimento na atmosfera e nas camadas mais superficiais da crosta, a água pode percorrer desde o mais simples até o mais complexo dos caminhos.

Quando uma chuva cai, uma parte da água se infiltra através dos espaços vazios que encontra no solo e nas

rochas.

Pela ação da força da gravidade esta água vai se infiltrando até não encontrar mais espaços, começando então a se movimentar horizontalmente em direção às áreas de baixa pressão. A única força que se opõe a este movimento é a força de adesão das moléculas de água às superfícies dos grãos ou das rochas por onde penetra.

A água da chuva que não se infiltra, escorre sobre a superfície em direção às áreas mais baixas, indo alimentar diretamente os riachos, rios, mares, oceanos e lagos.

Na atmosfera, forma as nuvens que, quando carregadas, provocam precipitações, na forma de chuva, granizo, orvalho e neve. Em regiões suficientemente frias, como nas grandes altitudes e baixas latitudes (calotas polares), esta água pode se acumular na forma de gelo, onde poderá ficar imobilizada por milhões de anos.

Nos continentes, a água precipitada pode seguir os diferentes caminhos:

- Infiltra e percola (passagem lenta de um líquido através de um meio) no solo ou nas rochas, podendo ressurgir na superfície na forma de nascentes, fontes, pântanos, ou alimentar rios e lagos. A infiltração é importante, portanto, para regularizar a vazão dos rios, distribuindo-a ao longo de todo o ano, evitando, assim, os fluxos repentinos, que provocam inundações.
- Flui lentamente entre as partículas e espaços vazios dos solos e das rochas, podendo ficar armazenada por um período muito variável, formando e alimentando os aquíferos. O caminho subterrâneo das águas é o mais lento de todos.
- Escoa sobre a superfície, nos casos em que a precipitação é maior do que a capacidade de absorção do solo.

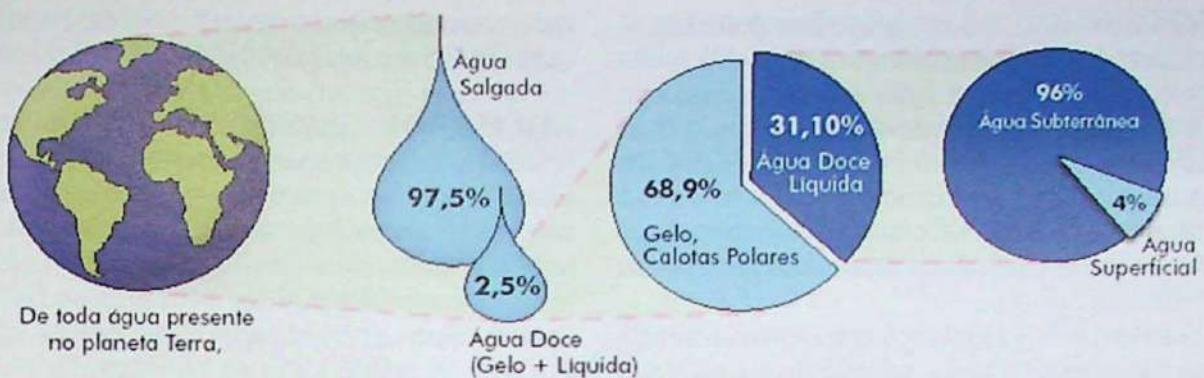


Figura 1 – Distribuição da água na terra. Cartilha mma, 20072.

Tabela 1 – Volumes de água da terra- águas subterrâneas, ANA – 2002

TIPO	OCORRÊNCIA	VOLUMES (KM ³)
Água doce superficial	Rios Lagos	1.250 125.000
Água doce subterrânea	Umidade do solo Até 800 metros Abaixo de 800 metros	67.000 4.164.000 4.164.000
Água doce sólida (gelo)	Geleiras e Glaciais	29.200.000
Água salgada	Oceanos Lagos e mares salinos	1.320.000.000 105.000
Vapor de água	Atmosfera	12.900
Total		1.360.000.000

- Evapora retornando à atmosfera. Em adição a essa evaporação da água dos solos, rios e lagos, uma parte da água é absorvida pelas plantas. Essas, por sua vez, liberam a água para a atmosfera através da transpiração. A esse conjunto, evaporação mais transpiração, dá-se o nome de evapotranspiração.
- Congela formando as camadas de gelo nos cumes de montanha e geleiras.

Apesar das denominações água superficial, subterrânea e atmosférica, é importante salientar que, na realidade, a água é uma só e está sempre mudando de condição. A água que precipita na forma de chuva, neve ou granizo, já esteve no subsolo, em icebergs e passou pelos rios e oceanos. A água está sempre em movimento; é graças a isto que ocorrem: a chuva, a neve, os rios, lagos, oceanos, as nuvens e as águas subterrâneas.

DISTRIBUIÇÃO DA ÁGUA NO SUBSOLO A distribuição vertical da água após a sua infiltração no subsolo se verifica conforme abaixo(Figura 3):

ZONA DE AERAÇÃO É a parte do solo que está parcialmente preenchida por água. Nesta zona a água ocorre na forma de películas adheridas aos grãos do solo. Solos muito finos tendem a ter mais umidade do que os mais grosseiros, pois há mais superfícies de grãos onde a água

pode ficar retida por adesão. Na zona de aeração podemos distinguir três regiões:

ZONA DE UMIDADE DO SOLO É a parte mais superficial, onde a perda de água de adesão para a atmosfera é intensa. Em alguns casos é muito grande a quantidade de sais que se precipitam na superfície do solo após a evaporação desta água, dando origem a solos salinizados ou a crostas ferruginosas (lateríticas).

ZONA INTERMEDIÁRIA Região compreendida entre a zona de umidade do solo e a franja capilar, com umidade menor do que na franja capilar e maior do que na zona superficial do solo.

Como já foi dito, a capilaridade é maior em terrenos cuja granulometria é muito fina. Em áreas onde o nível freático está próximo da superfície, a zona intermediária pode não existir, pois a franja capilar atinge a superfície do solo. São brejos e alagadiços, onde há uma intensa evaporação da água subterrânea.

FRANJA DE CAPILARIDADE A região mais próxima ao nível d'água do lençol freático, onde a umidade é maior devido à presença da zona saturada logo abaixo. A água existente nesta zona é denominada água capilar, originada do contato com a água do nível freático e que ascende devido a forças capilares.

ZONA DE SATURAÇÃO É a região abaixo do lençol freático (nível freático) onde os poros ou fraturas da rocha estão totalmente preenchidos por água. Observe-se que em um poço escavado num aquífero deste tipo a água o estará preenchendo até o nível freático. Em aquíferos freáticos o nível da água varia segundo a quantidade de chuva. Em épocas com mais chuva o nível freático sobe e em épocas em que chove pouco o nível freático desce. Um poço perfu-

rado no verão poderá ficar seco caso sua penetração na zona saturada for menor do que esta variação do nível d'água.

AQÜÍFEROS Aquíferos são corpos rochosos com propriedades de armazenar e transmitir as águas subterrâneas. Os aquíferos são caracterizados por parâmetros dimensionais como extensão, espessura e geometria os quais são condicionados pela Geologia Estrutural, Estratigrafia e

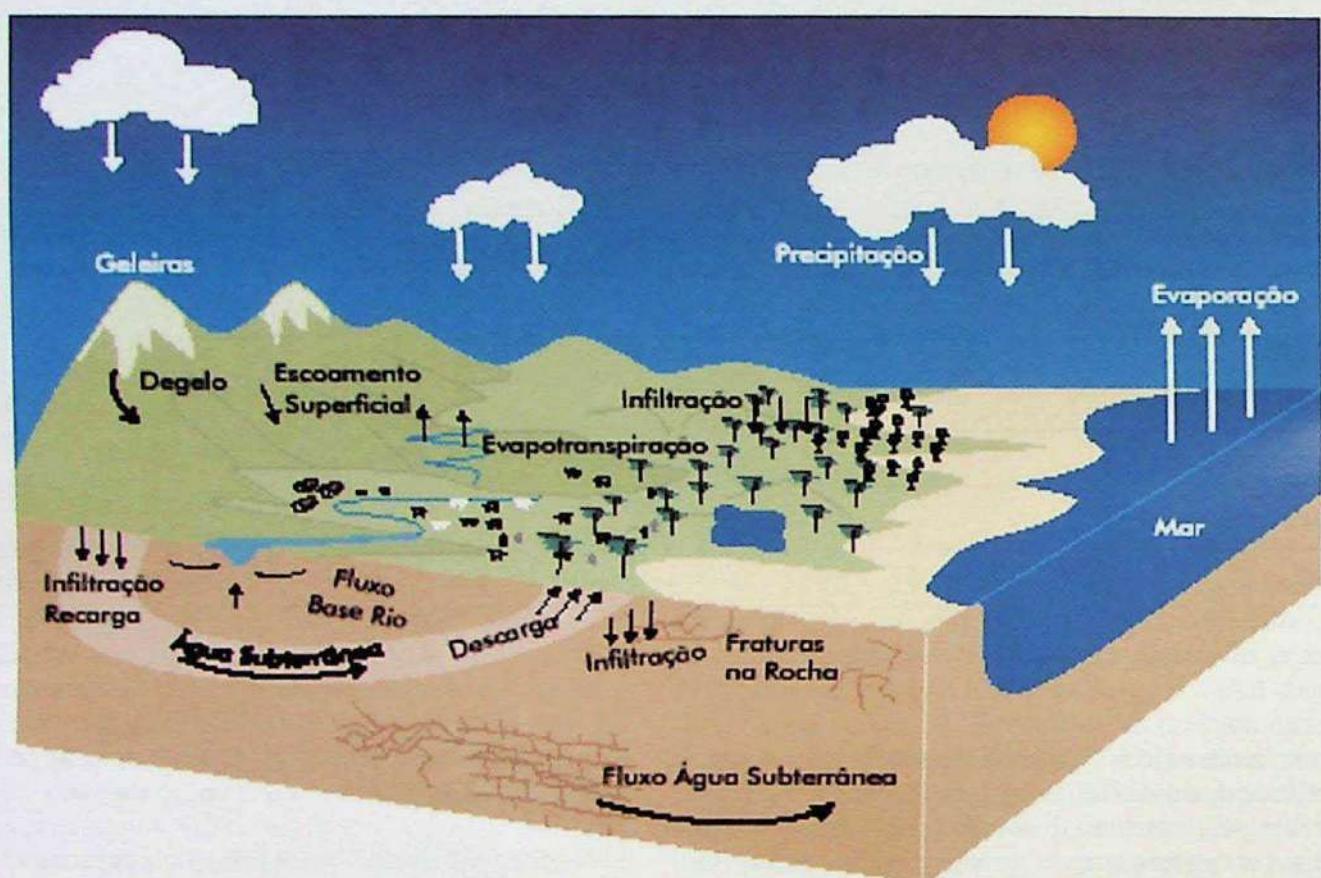


Figura 2 – Ciclo hidrológico - Cartilha MMA, 2007.



Figura 3 – Distribuição vertical da água - Prof. Dr. Eurico Zimbres - UERJ

Parâmetros Hidrodinâmicos (transmissividade, armazenamento ou porosidade efetiva), que dependem dos padrões faciológicos, condições de recarga e descarga além de variáveis de estado que descrevem a situação do reservatório subterrâneo em cada instante (superfície piezométrica, qualidade, condições de exploração etc.). As águas subterrâneas são realimentadas pelas infiltrações de águas de origem meteóricas. Essas águas fluem lentamente (mm/dia, cm/dia ou m/dia) pelos poros e ou fissuras/fraturas intercomunicantes das rochas, armazenando-se em reservatórios subterrâneos ou alimentando os rios (efluência), lagos e nascentes durante os períodos sem chuvas, ou ainda, vão desaguar diretamente nos oceanos e mares, de onde evaporam e sobem à atmosfera para dar origem a novas chuvas, representando parcela significativa do ciclo hidrológico.

A taxa de infiltração de água no solo depende de muitos fatores, entre os quais:

- Sua porosidade: A presença de argila no solo diminui sua porosidade, não permitindo uma grande infiltração.
- Cobertura vegetal: Um solo coberto por vegetação é mais permeável do que um solo desmatado.
- Inclinação do terreno: em declividades acentuadas a água corre mais rapidamente, diminuindo o tempo de infiltração.

Tipo de chuva: Chuvas intensas saturam rapidamente o solo, ao passo que chuvas finas e demoradas têm mais tempo para se infiltrarem.

A água que se infiltra está submetida a duas forças fundamentais: a gravidade e a força de adesão de suas moléculas às superfícies das partículas do solo (força de capilaridade). Pequenas quantidades de água no solo tendem a

se distribuir uniformemente pela superfície das partículas. A força de adesão é mais forte do que a força da gravidade que age sobre esta água. Como consequência ela ficará retida, quase imóvel, não atingindo zonas mais profundas. Chuvas finas e passageiras fornecem somente água suficiente para repor esta umidade do solo. Para que haja infiltração até a zona saturada é necessário primeiro satisfazer esta necessidade da força capilar.

Características dos aquíferos Para entendermos melhor o que são os aquíferos e suas características, serão apresentadas algumas definições que ajudarão a compreender o tema. As águas subterrâneas são aquelas que se encontram sob a superfície da Terra, preenchendo os espaços vazios existentes entre os grãos do solo, rochas e fissuras (rachaduras, quebras, descontinuidades e espaços vazios).

A Figura 4 mostra o caminho percorrido pelas águas, desde a superfície, passando pela:

- zona não saturada, onde a água e o ar preenchem os espaços vazios entre os grânulos;
- zona saturada, onde a maioria dos espaços vazios é preenchida por água.

No limite entre as duas zonas, ocorre o nível freático, que demarca o contato entre estas, conhecido popularmente como lençol freático.

Tipos de aquíferos Hidrogeologia é a ciência que estuda as águas subterrâneas (áquiferos), seu movimento, ocorrência, propriedades, interações com o meio físico e biológico, bem como os impactos das ações dos seres humanos na qualidade e quantidade nessas águas (poluição,

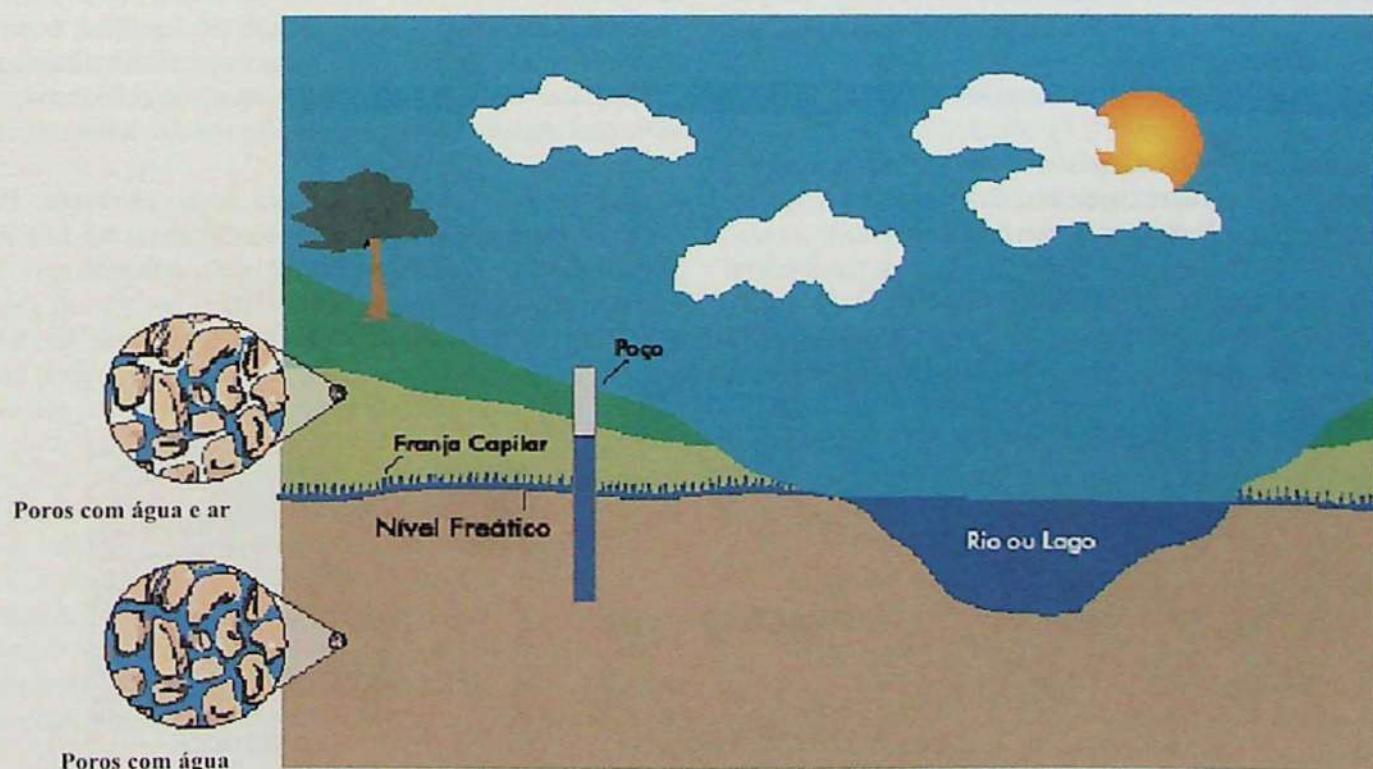


Figura 4 - Caracterização esquemática das zonas saturadas e não saturadas no subsolo. (MMA, 2007).

contaminação e superexplotação). As rochas saturadas que permitem a circulação, armazenamento e extração de água são chamados de aquíferos. Geralmente os aquíferos possuem a capacidade de armazenar grande quantidade de água. Neste contexto, é importante observar que as rochas podem ser classificadas em sedimentares, ígneas ou metamórficas:

- ígneas (granitos, basaltos, diabásio e piroclásticas) são aquelas formadas diretamente pelo magma, material similar aquele lançado pelos vulcões. São também chamadas rochas cristalinas ou embasamento cristalino, onde a água subterrânea ocorre nas falhas; fraturas e fissuras.
- sedimentares (conglomerados, arenitos, siltitos, argilitos, pelitos, folhelhos, sedimentos calcários, lentes, entre outras) são formadas por fragmentos de rochas preexistentes, desagregados pela erosão, transportados e acumulados em locais propícios à deposição. São as rochas que compõem as bacias sedimentares, formando os melhores aquíferos.
- metamórficas (metassedimentos, metacalcários, mármore, gnaisses, xistos, milonitos, etc) são formadas pela transformação de outras rochas, sob ação da pressão ou temperatura. (Adaptado de ABEAS, 1999)

Os aquíferos podem ser classificados quanto aos tipos de espaços vazios em (Figura 5):

(a) Poroso – com água armazenada nos espaços entre os grãos criados durante a formação da rocha; são o caso das rochas sedimentares, como os arenitos do Sistema Aquífero Guarani. Os aquíferos porosos funcionam como esponjas onde os espaços vazios são ocupados por água.

(b) Fissural (cristalino/embasamento cristalino) – a água circula pelas fissuras resultantes do fraturamento das rochas relativamente impermeáveis (ígneas ou metamórficas), como os basaltos, que estão sobre arenitos do Guarani.

(c) Cárticos – São os aquíferos formados em rochas carbonáticas (sedimentares, ígneas ou metamórficas). Constituem um tipo peculiar de aquífero fraturado, onde as fraturas, devido à dissolução do carbonato pela água, podem atingir aberturas muito grandes, criando, neste caso, verdadeiros rios subterrâneos. São exemplos as regiões da Gruta

de Maquiné, São Domingos, Vale do Ribeira e Bonito.

Classificação dos Aquíferos Segundo a Pressão da Água

AQUÍFEROS LIVRES OU FREÁTICOS A pressão da água na superfície da zona saturada está em equilíbrio com a pressão atmosférica, com a qual se comunica livremente (figura 6). São os aquíferos mais comuns e mais explorados pela população. São também os que apresentam maiores problemas de contaminação.

AQUÍFEROS ARTESIANOS Nestes aquíferos a camada saturada está confinada entre duas camadas impermeáveis ou semipermeáveis, de forma que a pressão da água no topo da zona saturada é maior do que a pressão atmosférica naquele ponto, o que faz com que a água suba no poço para além da zona aquífera. Se a pressão for suficientemente forte a água poderá jorrar espontaneamente pela boca do poço.

Neste caso diz-se que temos um poço artesiano ou jorante.

Há muitas possibilidades geológicas em que a situação de confinamento pode ocorrer.

A figura 6 abaixo mostra o modelo mais clássico, mais comum e mais importante.

Classificação dos Aquíferos Segundo a Geologia do Material Saturado

AQUÍFEROS POROSOS Ocorrem em rochas sedimentares consolidadas, sedimentos inconsolidados e solos arenosos decompostos *in situ*. Constituem os mais importantes aquíferos, pelo grande volume de água que armazem, e por sua ocorrência em grandes áreas.

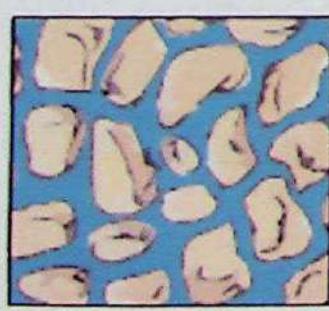
Estes aquíferos ocorrem nas bacias sedimentares e em todas as várzeas onde se acumularam sedimentos arenosos.

Uma particularidade deste tipo de aquífero é sua porosidade quase sempre homogeneamente distribuída, permitindo que a água flua para qualquer direção, em função tão somente dos diferenciais de pressão hidrostática ali existentes.

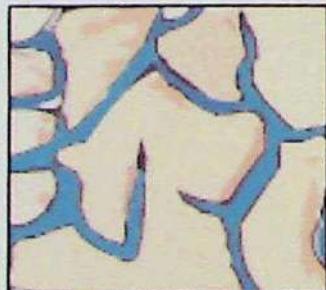
Esta propriedade é conhecida como isotropia. Poços perfurados nestes aquíferos podem fornecer até 1.000 metros cúbicos por hora de água de boa qualidade.

AQUÍFEROS FRATURADOS OU FISSURADOS

Ocor-



POROSO



FISSURAL



CÁRSTICO

Figura 5 - Caracterização esquemática dos tipos de aquíferos. (MMA, 2007).

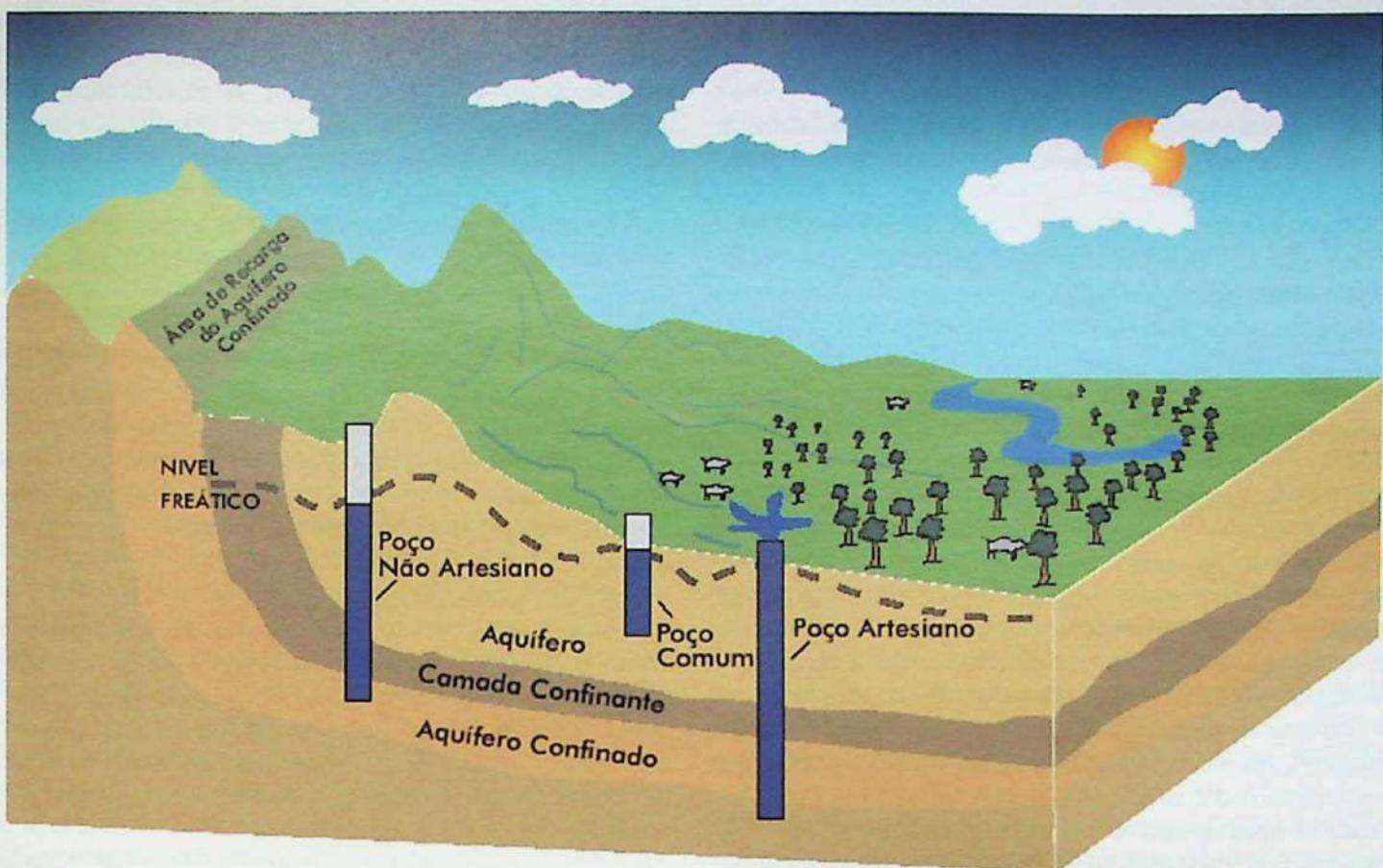


Figura 6 - Classificação dos aquíferos, com respectivos níveis de pressão - (MMA, 2007).

rem em rochas ígneas e metamórficas. A capacidade destas rochas em acumularem água está relacionada à quantidade de fraturas, suas aberturas e intercomunicação.

No Brasil a importância destes aquíferos está muito mais em sua localização geográfica, do que na quantidade de água que armazenam.

Poços perfurados nestas rochas fornecem poucos metros cúbicos de água por hora.

A possibilidade de se ter um poço produtivo depende ria, tão somente, de o mesmo interceptar fraturas capazes de conduzir a água.

Há caso em que, de dois poços situados a pouca distância um do outro, somente um venha a fornecer água, sendo o outro seco.

Para minimizar o fracasso da perfuração nestes terrenos, faz-se necessário que a locação do poço seja bem estudada por profissional competente.

Nestes aquíferos a água só pode fluir onde houver fraturas, que, quase sempre, tendem a ter orientações preferenciais, e por isto dizemos que são meios aquíferos anisotrópicos, ou que possuem anisotropia.

Um caso particular de aquífero fraturado é representado pelos derrames de rochas ígneas vulcânicas basálticas, das grandes bacias sedimentares brasileiras.

Estas rochas, apesar de ígneas, são capazes de fornecer volumes de água até dez vezes maiores do que a maioria das rochas ígneas e metamórficas.

AQÜÍFEROS CÁRSTICOS São os aquíferos formados em rochas carbonáticas. Constituem um tipo peculiar de

aquífero fraturado, onde as fraturas, devidas à dissolução do carbonato pela água, podem produzir aberturas muito grandes, criando, neste caso, cavernas interligadas e verdadeiros rios subterrâneos.

É comum em regiões com grutas calcárias, ocorrendo em várias partes do Brasil. Proporcionalmente à sua extensão territorial, o Brasil não é muito rico em águas subterrâneas.

Essa situação decorre do fato de que, sobre cerca de 60% do nosso território (4.600.000 Km²), ocorrerem rochas cristalinas, relativamente pouco porosas e permeáveis. Em complementação, as rochas essencialmente aquíferas acham-se localizadas nos depósitos sedimentares que cobrem cerca de 37% (3.166.000 Km²).

Na figura 7 apresentamos de forma resumida os domínios sedimentares e cristalinos do Brasil, sendo que os aquíferos cársticos se enquadram na categoria fissural.

Funções dos Aquíferos Muito mais do que armazenar e transmitir água subterrânea os aquíferos tem funções relevantes tais como (Adaptado de Rebouças, 1997 e Rebouças et al. 2002):

- Produção - fornecem água em quantidade e qualidade adequadas para os usos múltiplos;
- Estocagem e Regularização - armazem água em períodos de chuva e cedem em épocas de estiagem para rios e lagos;
- Filtragem - atuam como filtros naturais, minimizando os custos de tratamento para consumo;
- Transporte - conduzem água de uma área de recarga

(onde a água infiltra) para as áreas de bombeamento, onde estão situados os poços;

- Estratégica - protegem a água armazenada tanto da evaporação, como das consequências das guerras e sabotagens;

- Energética - permitem a utilização da água subterrânea aquecida pelo gradiente geotermal, como fonte de energia elétrica ou termal;

- Ambiental - fornecem água para a manutenção dos ecossistemas e da biodiversidade.

Porém a função mais tradicional e ainda de maior alcance de um aquífero é como fornecedor de água naturalmente potável. Os processos de filtração e as reações bio-geoquímicas que ocorrem no subsolo fazem com que as águas subterrâneas apresentem, geralmente, boa potabilidade e sejam mais bem protegidas dos agentes de poluição.

As águas subterrâneas, quando apresentam teores de STD (Sólidos Totais Dissolvidos) superiores a 1g/l, ou possuem uma concentração especialmente elevada de um ion particular, são classificadas como águas minerais.

Quando apresentam temperaturas superiores a 40°C constituem fonte alternativa de energia, podendo ser utilizadas para aquecimento de casas, fins fisioterápicos, produção agrícola em estufa etc.

Quando o teor de sais contidos é elevado podem constituir importantes fontes de componentes minerais como Iodo, Bromo, Boro e Cloreto de Sódio.

Assim, a exploração da água subterrânea apresenta inúmeras vantagens em comparação com as águas superficiais:

- Dispensa tratamento químico que onera bastante as águas superficiais em dispendiosas ETAs (Estações de Tratamento de Águas).

- Não acarreta inundações de áreas potencialmente aproveitáveis na superfície, as quais contêm muitas vezes excelentes solos agricultáveis, pois a área de captação e proteção é extremamente reduzida.

- A rede de adução até o reservatório ou caixa d'água usualmente é de pequena extensão, ao contrário das barragens, que requerem redes adutoras comumente de vários quilômetros de extensão.

- Não exigem desapropriação de grandes áreas como as barragens, que demandam vultosos investimentos.

- Independente de períodos de estiagens prolongadas para recarga anual e dos efeitos contínuos do processo de evaporação.

- O prazo de execução de um poço tubular é de dias, em contraposição a meses e até anos no caso do barramento de um rio.

- A implantação do sistema de captação e armazena-

mento pode ser efetuada de modo gradativo, na medida do aumento da demanda, evitando períodos de sobra logo após a construção da barragem. A flexibilidade evita a aplicação de grandes investimentos iniciais concentrados em curto espaço de tempo.

- O sistema como um todo é muito melhor protegido de eventuais poluições e contaminações químicas, e até mesmo de atos de vandalismo.

Mesmo com todas as vantagens citadas, a exploração da água subterrânea deve ser feita sempre de uma maneira integrada com a gestão da água superficial (de forma que a recíproca também é fundamental) e necessita, sobretudo ser controlada por técnicos especializados, pois existem peculiaridades que precisam ser monitoradas, como por exemplo:

- A distribuição espacial das bacias hidrogeológicas com potencial de volume explorável faz-se de maneira muito heterogênea. No Brasil, sobretudo na região Nordeste, 55% da sua geologia são representados por rochas cristalinas onde as águas potencialmente exploráveis são pouco representativas, já que esse tipo de aquífero não favorece o acúmulo de água.

- A renovação e recarga das águas retiradas dos aquíferos não se fazem na mesma velocidade da extração, podendo causar a exploração de parte ou de toda a Reserva Permanente, com risco da exaustão do aquífero, caso a exploração não seja devidamente controlada.

- A superexploração de aquíferos que, dependendo da formação geológica e da pressão hidrostática de equilíbrio exercida pela água, poderá acarretar subsidência na porção mais superficial, causando fendas nas rochas com aparecimento de possíveis sumidouros em correntes de águas superficiais, rachaduras em barragens, podendo causar rompimento das mesmas, rachaduras e desabamentos de casas ou edifícios, diminuição ou ausência total da umidade mínima dos horizontes de solos responsáveis pela sobrevivência de vegetais e microorganismos da superfície que ajudam na preservação da biota, além de que em aquíferos costeiros poderá causar a salinização da água.

Mesmo sendo menos vulneráveis aos agentes poluidores e às contaminações, a detecção de um processo contaminante num aquífero, em geral não é imediata, podendo muitas vezes acarretar ações muito onerosas ou até mesmo situações irrecuperáveis no médio prazo.

CAPTAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

Qualquer perfuração através da qual obtemos água de um aquífero é, genericamente, chamada de poço. Há muitas formas de classificá-los. Usaremos aqui uma classificação baseada em sua profundidade, pois a mesma determina, de uma forma geral, o método construtivo, além de ser um fator importante nas considerações sobre poluição da água subterrânea.

Poço Escavado É a mais antiga forma de exploração da água subterrânea, estando presente desde civilizações muito antigas.

São poços cilíndricos, abertos manualmente, com o uso de picareta e pá. Às vezes são usados fogachos (pólvora) para romper blocos de rocha mais resistentes.

Entretanto, este expediente é desaconselhável em virtude do perigo que acarreta, sendo proibido por lei a pessoas não autorizadas a lidar com explosivos.

Poço escavado é o tipo mais utilizado pela população rural brasileira e, recebe nomes distintos, dependendo da região: cisterna, cacimba, cacimbão, poço amazonas, poço caipira, ou simplesmente poço. Só podem ser escavados em materiais não muito resistentes, geralmente solo e depósitos sedimentares pouco consolidados. Certos arenitos friáveis podem ser escavados até manualmente.

Para que o operário possa trabalhar no fundo do poço, seu diâmetro deve ser grande, indo de 1 a 2 metros, em média 1,50 metros.

Após atingir o nível d'água, a escavação continua, até que não se consiga mais esvaziar a água que está afluindo ao poço.

Após a construção o poço deve ser bem fechado, erguendo-se uma proteção de tijolo acima do nível do terreno, e cimentando o solo ao redor. Isso evita a entrada de água contaminada da superfície e a queda de objetos e animais em geral.

Ponteiras cravadas Ponteira é uma haste perfurada, revestida por tela, com terminação cônica e que é cravada no terreno, através da qual pode-se retirar água com bomba de succão. Muito popular, só funciona em aquíferos muito rasos.

Muito usada em obras de engenharia civil para o rebaixamento do lençol freático. É necessário que os segmentos de tubos que foram conectados na ponteira, sejam bem vedados para não entrar ar, o que impediria a água de subir.

Em geral estes poços possuem de 4 a 5 cm de diâmetro. Essas ponteiras são muito versáteis, e uma boa opção para um poço de baixo custo. Caso a necessidade de água aumente, pode-se cravar mais ponteiras, mantendo uma distância segura para evitar as interferências dos cones de depressão.

Poço a Trado Trado é uma ferramenta composta de uma caçamba cilíndrica, com aberturas laterais cortantes, rosqueada à uma haste de ferro terminada em T e que penetra no solo através de movimentos giratórios, realizados por um operário (trado manual) ou por um motor (trado mecânico).

Há no mercado trados com diâmetro variando de 5 a 24 centímetros. Quanto maior for o diâmetro do trado, mais pesado ficará o serviço. O poço é perfurado lentamente, pois após algumas voltas o operador tem que levantar a ferramenta para retirar o solo preso na caçamba. À medida que a profundidade aumenta são acrescentados novos segmentos de cano galvanizado na haste, que se tornará, portanto mais pesada. Ao atingir o nível freático é necessário descer um ou mais tubos que protejam a parede do

poço, evitando seu desmoronamento.

Para continuar a perfuração na zona saturada é necessário diminuir o diâmetro da caçamba para poder perfurar por dentro do tubo de revestimento. Quando o poço começa a produzir muita água, o avanço se torna muito difícil, pois há a formação de lama no fundo, tornando-se quase impossível a retirada do material.

Após ter atingido a máxima profundidade possível da zona saturada, coloca-se um tubo de fundo cego e furos na lateral, que servirá como filtro e elemento de contenção das paredes da escavação.

Poço Coletor Horizontal Os poços coletores tem uma distribuição radial dos filtros e são obras para captação de água subterrânea construídas em sedimentos inconsolidados saturados de água. É fundamental saber o tamanho e extensão do aquífero de onde a água subterrânea será extraída, a espessura deste aquífero e a condutividade hidráulica do aquífero. Os poços coletores radiais são obras para captação de água subterrânea construídas em sedimentos inconsolidados saturados de água, preferencialmente alimentados por fonte conhecida e com vazão média muito superior ao pretendido pela demanda (Souza, JCS 2004).

Galerias As galerias são túneis cavados horizontalmente nas encostas até se encontrar o substrato rochoso, por onde, circula a água de infiltração. Uma vez encontrada uma região onde esteja havendo suficiente infiltração, cava-se uma pequena bacia de captação a partir da qual a água é levada para fora, através de tubos e por gravidade. Como a saída de água passa a ser constante, é necessária a construção de reservatório para armazená-la.

Uma das grandes vantagens destas galerias é que fornecem água por gravidade, o que implica numa grande economia de energia. Na verdade são verdadeiras nascentes artificiais. Nas cidades serranas do Estado do Rio de Janeiro são muito utilizadas. Em Petrópolis existem galerias com cerca de 40 metros de comprimento, sem nenhum revestimento, e que fornece até 200 litros de boa água por hora, durante o período de estiagem. A largura e altura destas galerias são o suficiente para que um homem possa ali se movimentar carregando um carrinho de mão, com o qual é retirado o solo escavado. Seu teto é abobadado. Após a construção e colocação de um tubo resistente como dreno, qualquer desmoronamento do teto não prejudicará a continuidade da saída da água. É um serviço extremamente perigoso e só deve ser feito por pessoas muito treinadas e conhecedoras da técnica.

Poços tubulares O acesso as águas subterrâneas normalmente se dá por meio da perfuração de poços tubulares profundos, executados por equipamentos adequados, as sondas perfuratrizes, com profundidades entre 50 e 2.000 m. Há toda uma tecnologia envolvida e uma legislação a ser obedecida, conforme Tabela 2 abaixo:

PROPRIEDADES DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS
As características e propriedades conferem às águas subterrâneas diversas vantagens entre elas:

- Qualidade – As águas subterrâneas possuem eleva-

do padrão de qualidade físico-química e bacteriológica. Por serem naturalmente protegidas (mas não imunes) dos agentes de poluição e contaminação, essas águas dispensam, na maioria dos casos, tratamento físico-químico.

- Quantidade – Os volumes são superiores aos das águas superficiais. Sua vazão (quantidade de água/tempo) é menos afetada por períodos de estiagem prolongada e não apresenta perdas por evaporação, como nos reservatórios de superfície.

- Distribuição – As águas subterrâneas ocupam áreas muito maiores do que a calha de um rio ou lagoa, o que permite a perfuração de poços nos locais onde as demandas ocorrem. Nesse sentido, as águas subterrâneas facilitam a distribuição setorizada, visto que a distância dos poços até o reservatório ou caixa de água é, em geral, de pequena extensão.

- Usos – Além dos diversos usos das águas subterrâneas (por exemplo, abastecimento, indústria, agricultura, entre outros), aquelas que apresentam temperaturas elevadas também podem ser exploradas economicamente em atividades relacionadas com o turismo termal (estâncias termais) e na indústria.

- Custos – O valor de perfuração dos poços, assim como os prazos de execução, são geralmente inferiores aos necessários para as obras de captação e transporte de águas de superfície. Outro fator a ser destacado é a facilidade da perfuração de poços que permite planejar a implantação gradual do sistema de abastecimento à medida que cresce a demanda, e os custos de manutenção e operação são mais baixos. Além disso, não há custo de armazenamento primário, como nas barragens e açudes, e não requer a desapropriação de grandes áreas.

- Meio ambiente – Os impactos ambientais relacionados com as instalações para o aproveitamento das águas subterrâneas são consideravelmente pequenos, quando

instalados e operados adequadamente, ficando restritos a área de captação (poço tubular). Para efeito de comparação citam-se os impactos causados pelas barragens, que envolvem grandes áreas e alteram o equilíbrio dos ecossistemas.

IMPACTOS SOBRE AS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

Com o crescimento das cidades e aumento da demanda por água, tanto em ambiente urbano quanto rural, os problemas envolvendo a manutenção da qualidade e da quantidade das águas superficiais e subterrâneas tendem a se agravar.

Neste contexto, é importante lembrar que tudo que afeta as águas subterrâneas pode também afetar as águas superficiais, já que estas possuem uma forte relação.

No Brasil, os problemas mais comuns das águas subterrâneas estão relacionados com a superexploração, impermeabilização do solo e com a poluição.

Superexploração A superexploração, ou seja, quando a extração de água ultrapassa o volume infiltrado, pode afetar o escoamento básico dos rios, secar nascentes, influenciar os níveis mínimos dos reservatórios, provocar subsidência (afundamento) dos terrenos, induzir o deslocamento de água conta-minada, salinizar, provocar impactos negativos na biodiversidade e até mesmo a exaurir completamente o aquífero.

Em áreas litorâneas, a superexploração de aquíferos pode provocar a movimentação da água do mar no sentido do continente, ocupando os espaços deixados pela água doce (processo conhecido como intrusão da cunha salina). (Adaptado de Feitosa – 1997)

Poluição das águas Devido às baixas velocidades de infiltração e aos processos biológicos, físicos e químicos que ocorrem no solo e na zona não saturada, os aquíferos são naturalmente mais protegidos da poluição.

Porém, ao contrário das águas superficiais, uma vez ocorrida a poluição, as baixas velocidades de fluxo tendem a promover uma recuperação muito lenta da quali-

Tabela 2 – Legislação vigente para projeto e construção de poços tubulares, ABNT 2008

Código	Título ABNT	Publicação	Situação
NBR13604	Filtros e tubos de revestimento em PVC para poços tubulares profundos	01/05/1996	Em vigor
NBR13605	Filtros e tubos de revestimento em PVC para poços tubulares profundos - Determinação dimensional	30/05/1996	Em vigor
NBR13606	Tubos de revestimento em PVC para poços tubulares profundos - Determinação do módulo de elasticidade à flexão	30/05/1996	Em vigor
NBR13607	Tubos de revestimento em PVC para poços tubulares profundos - Verificação da flexão ao impacto	30/05/1996	Em vigor
NBR13608	Tubos de revestimento em PVC para poços tubulares profundos - Verificação do desempenho da junta rosácea	30/05/1996	Em vigor
NBR13609	Tubos de revestimento em PVC para poços tubulares profundos - Verificação da resistência à tração das juntas	30/05/1996	Em vigor
NBR12244	Poço tubular - Construção de poço tubular para captação de água subterrânea	31/03/2006	Em vigor
NBR12212	Poço tubular - Projeto de poço tubular para captação de água subterrânea	31/03/2006	Em vigor

dade. Dependendo do tipo de contaminante, essa recuperação pode levar anos, com custos muito elevados, não raro, proibitivos.

O risco potencial de um determinado aquífero ser contaminado está relacionado ao tipo de contaminante e suas características, como: litologia (tipo de rocha), hidrogeologia, gradientes hidráulicos (diferença de pressão entre dois pontos), entre outros.

A maior ou menor susceptibilidade de um aquífero à contaminação e poluição é chamada de vulnerabilidade.

A poluição/contaminação da água subterrânea pode ser direta ou indireta. Ambas podem estar relacionadas com as atividades humanas e/ou por processos naturais (figura 7). As fontes mais comuns de poluição e contaminação direta das águas subterrâneas são:

- deposição de resíduos sólidos no solo: descarte de resíduos provenientes das atividades industriais, comerciais ou domésticas em depósitos a céu aberto, conhecidos como lixões. Nessas áreas, a água de chuva e o líquido resultante do processo de degradação dos resíduos orgânicos (denominado chorume), tendem a se infiltrar no solo, carreando substâncias potencialmente poluidoras, metais pesados e organismos patogênicos (que provocam doenças).
- esgotos e fossas: o lançamento de esgotos diretamente sobre o solo ou na água, os vazamentos em coletores de esgotos e a utilização de fossas construídas de forma inadequada constituem as principais causas de contaminação da água subterrânea.
- atividades agrícolas: fertilizantes e agrotóxicos uti-

lizados na agricultura podem contaminar as águas subterrâneas com substâncias como compostos orgânicos, nitratos, sais e metais pesados. A contaminação pode ser facilitada pelos processos de irrigação mal manejados que, ao aplicarem água em excesso, tendem a facilitar que estes contaminantes atinjam os aquíferos.

- mineração: a exploração de alguns minérios, com ou sem utilização de substâncias químicas em sua extração, produz rejeitos líquidos e/ou sólidos que podem contaminar os aquíferos.

- Vazamento de substâncias tóxicas: vazamentos de tanques em postos de combustíveis, oleodutos e gasodutos, além de acidentes no transporte de substâncias tóxicas, combustíveis e lubrificantes.

- Cemitérios: fontes potenciais de contaminação da água, principalmente por microorganismos.

As formas mais comuns de poluição/contaminação indireta são:

- filtragem vertical descendente: poluição de um aquífero mais profundo pelas águas de um aquífero livre superior (que ocorre acima do primeiro).

- Contaminação natural: provocada pela transformação química e dissolução de minerais, podendo ser agravada pela ação antrópica (aquele provocada pelos seres humanos), por exemplo, a salinização, presença de ferro, manganês, carbonatos e outros minerais associados a formação rochosa.

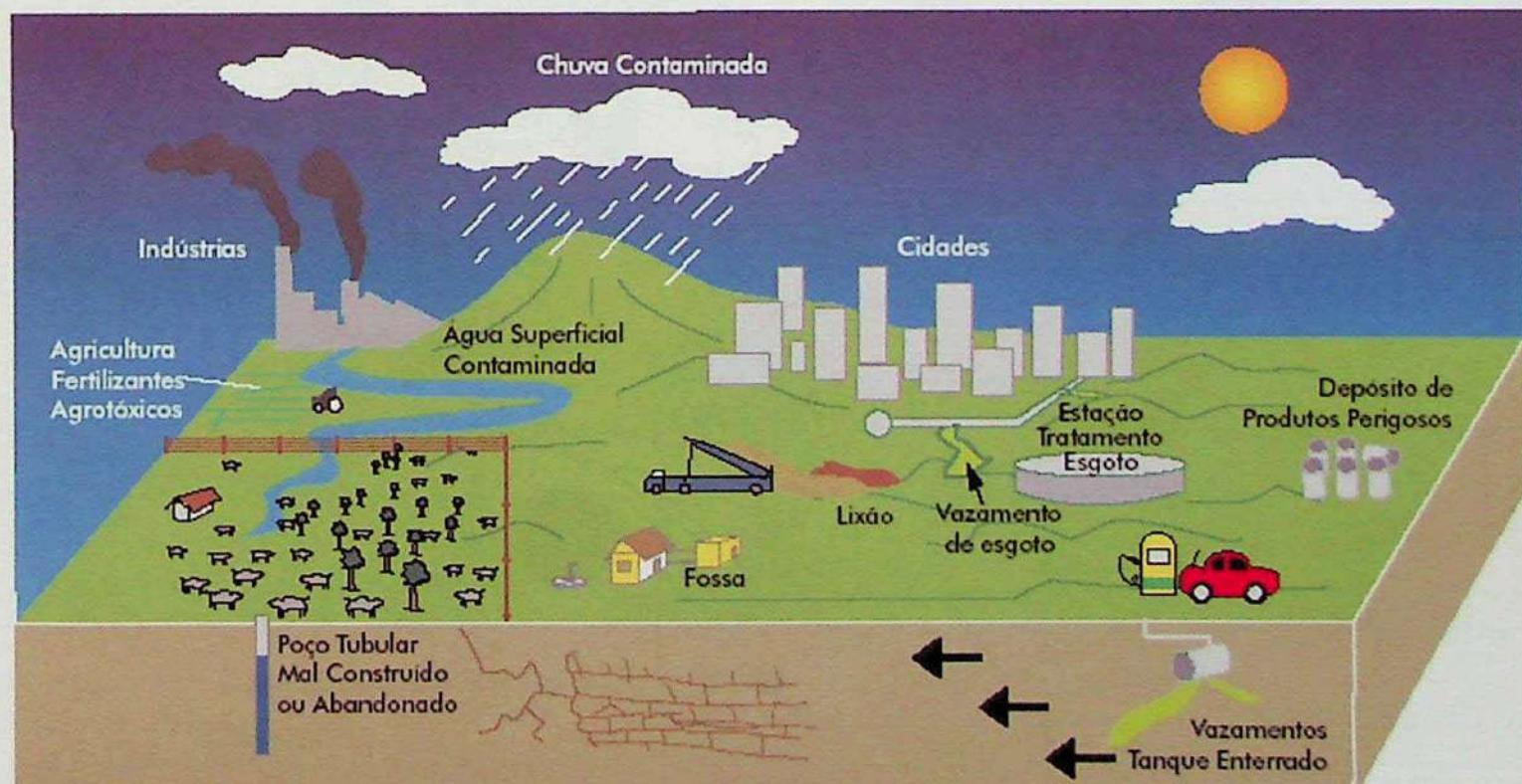


Figura 7 - Principais fontes de contaminação de águas subterrâneas - (MMA, 2007).

- poços mal construídos e/ou abandonados: poços construídos sem critérios técnicos, com revestimento corroído/rachado, sem manutenção e abandonados sem o fechamento adequado (tamponamento), podem constituir vias importantes de contaminação das águas subterrâneas.

Impermeabilização O crescimento das cidades causa diversos impactos ao meio ambiente, com reflexos diretos na qualidade e quantidade da água. A impermeabilização do solo a partir da construção de casas, prédios, asfaltamento de ruas, ausência de jardins e parques, entre outros, reduz a capacidade de infiltração da água no solo. Como a água não encontra locais para infiltrar, acaba escoando pela superfície, adquirindo velocidade nas áreas de declive acentuado, em direção às partes baixas do relevo. Os resultados desse processo são bastante conhecidos: redução do volume de água na recarga dos aquíferos, erosão dos solos, enchentes e assoreamento dos cursos de água. Normalmente os rios possuem dois leitos, o menor (onde a água escoa na maior parte do tempo), e o maior, que é naturalmente inundado em períodos de chuvas intensas. A ocupação do leito maior pelos seres humanos potencializa os impactos das enchentes. As enchentes causam grandes prejuízos à população, não só materiais, como de saúde (doenças de veiculação hídrica). Em locais sem redes plu-

viais e/ou coleta de lixo, o escoamento superficial tende a carregar grande quantidade de sedimentos e de lixo para os rios, aumentando o risco de enchente e comprometendo ainda mais a qualidade destas águas.

PRINCIPAIS SISTEMAS AQUIFEROS DO BRAZIL

SIL A ocorrência de água subterrânea no Brasil se dá conforme a disposição dos aquíferos e sua disponibilidade é apresentada, em termos médios, conforme exibido na figura 8 - Principais aquíferos do Brasil e na Tabela 3 - Disponibilidade de águas subterrâneas nos principais sistemas aquíferos do país.

DISPONIBILIDADE DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

AS NOS PRINCIPAIS SISTEMAS AQUÍFEROS DO BRASIL Na Tabela 4, complementarmente, apresentamos a produtividade média por poço nos principais aquíferos brasileiros.

Produtividade média dos poços nos principais aquife-

ros brasileiros Para facilitar o estudo das águas subterrâneas, o Brasil foi dividido em regiões homogêneas, formando 10 províncias hidrogeológicas (Figuras 9 e 10). Estas províncias são regiões onde os sistemas aquíferos apresentam condições semelhantes de armazenamento,



Figura 8 - Principais sistemas aquíferos do Brasil - conjuntura de recursos hidricos - águas subterrâneas.

Tabela 3 - Principais sistemas aquíferos do Brasil - conjuntura de recursos hídricos - águas subterrâneas – ANA, 2005

Disponibilidade de água subterrânea nos principais sistemas aquíferos do país.						
Sistema Aquífero	Tipo ¹	Região Hidrográfica Dominante	Área de Recarga (km ²)	Espessura média (m)	Precipitação (mm/ano)	Disponibilidade Hídrica ² (m ³ /s)
Solimões	P,L	Amazonas	457.664	-	2.206	896,3
Alter do Chão	P,L		312.574	-	2.098	249,5
Boa Vista	P,L		14.888	-	2.450	32,4
Parecis	P,L		88.157	150	1.890	464,8
Jandaíra	CF	Atl. NE Ori.	11.589	600	823	6,1
Açu	P,C		3.674	200	881	2,1
Itapécuru	P,L	Tocantins/Araguaia/Parnaíba	204.979	100	1.836	214,8
Corda	P,L,C		35.266	160	1.371	9,2
Motuca	P,L		10.717		1.470	3
Poti-Piauí	P,L,C		117.012	400	1.342	130
Cabeças	P,L,C		34.318	300	1.104	7,2
Serra Grande	P,L,C		30.450	500	943	12,7
Barreiras	P,L,C	Atl. Leste Atl SE Atl. NE Ori. Atl. NE Ocid. Tocantins/Araguaia	176.532	60	1.938	217
Beberibe	P,L,C	Atl. NE Ori.	318	100	2.073	0,4
Marizal	P,L,C	Atl. Leste/São Francisco	18.797	200	514	7,2
São Sebastião	P,L,C	Atl. Leste	6.783	-	1.358	8,2
Inajá	P,L,C	São Francisco	956	300	722	0,3
Tacaratu	P,L	São Francisco/Atl. NE Ori.	3.890	200	965	2,9
Exu	P,L		6.397	-	777	0,6
Missão Velha	P,L,C	Atl. NE Ori.	1.324	130	1.115	0,2
Urucuia-Areado	P,L	São Francisco/Parnaíba/Tocantis/Araguaia	144.086	300	1.294	236,4
Bambui	CF		181.868	-	1.165	40,3
Bauru-Caiuá	P,L	Paraná	353.420	200	1.457	587,9
Serra Geral	F	Paraná / Atl. Sul / Uruguai/Paraguai	411.855	150	1.681	746,3
Guarani	P,L,C		89.936	250	1.487	161,1
Ponta Grossa	P,L,C	Tocantins/Araguaia/Parnaíba	24.807	300	1.543	29,1
Furnas	P,L,C		24.894	200	1.511	28,6
Total			2.761.086			4.094,60

1: P:Poroso; L: Livre; C: Confinado; F: Fraturado; CF: Cártico-Fraturado

2,20% das Reservas Renováveis.

Tabela 4 – Produtividade média por poço - conjuntura de recursos hídricos - águas subterrâneas – ANA, 2005.

Produtividade dos Poços

Caracterização Geral		Produtividade de poços						
Sistema Aqüífero	Tipo	Aqüífero Livre			Aqüífero Confinado			
		Prof (m)	Q (m³/h)	CE	Prof (m)	Q (m³/h/m)	CE (m³/h/m)	
				(m³/h/m)				
Boa Vista	P e L	36	32,7	5,737				
Solimões	P e L	56	27,3	3,062				
Alter do Chão	P e L	133	53,8	1,893				
Parecis	P e L	102	146,9	8,83				
Barreiras	P, L e C	44	14,7	3,435	60	18,9	1,693	
Beberibe	P, L e C	182	34,1	1,293	246	77,7	3,752	
Jandaira	CF	98	6,2	4,19				
Açu	P e C				310	24,9	2,925	
Marizal	P, L e C	129	21,3	2,127	141	15,1	2,004	
São Sebastião	P, L e C	127	23,7	2,881	170	40,4	2,367	
Inajá	P, L e C	116	3,5	0,474	212	20,1	1,587	
Tacaratu	P e L	102	5,6	0,86				
Exu	P, L e C	58	6	0,223				
Missão Velha	P e C	79	6,8	0,663	79	14,4	2,325	
Bauru-Caiuá	P e L	140	18,7	0,919				
Serra Geral	F	123	22,8	1,913				
Guarani	P, L e C	111	13,8	1,019	263	54,2	2,525	
Ponta Grossa	P e L	150	5,8	0,369				
Furnas	P, L e C	124	17,4	1,556	195	46,4	1,51	
Itapecuru	P e L	91	12,3	1,862				
Corda	P, L e C	97	14,5	1,594	213	14,8	1,867	
Motuca	P e L	96	16,3	2,282				
Poti-Piauí	P, L e C	140	18	1,39	226	40	2,576	
Cabeças	P, L e C	109	12	1,774	284	50,2	8,179	
Serra Grande	P, L e C	158	6,3	0,439	172	14,7	2,406	
Urucuía-Areado	P e L	89	10,4	0,972				
Bambui	CF	86	13,4	4,811				

Prof. – Profundidade média dos poços; Q – Vazão média dos poços; CE – Capacidade específica

circulação e qualidade de água.

É importante ressaltar que os limites destas províncias não coincidem, necessariamente, com os das bacias hidrográficas. Desta forma, os aqüíferos ou sistemas aqüíferos, em geral, não guardam relação com estas, podendo abranger mais de uma bacia hidrográfica, se comportar como nascente ou divisor de bacias ou ainda constituir o baixo curso (mais próximo da foz) de uma ou mais bacias.

PROVÍNCIAS HIDROGEOLÓGICAS DO BRASIL X BACIAS HIDROGRÁFICAS

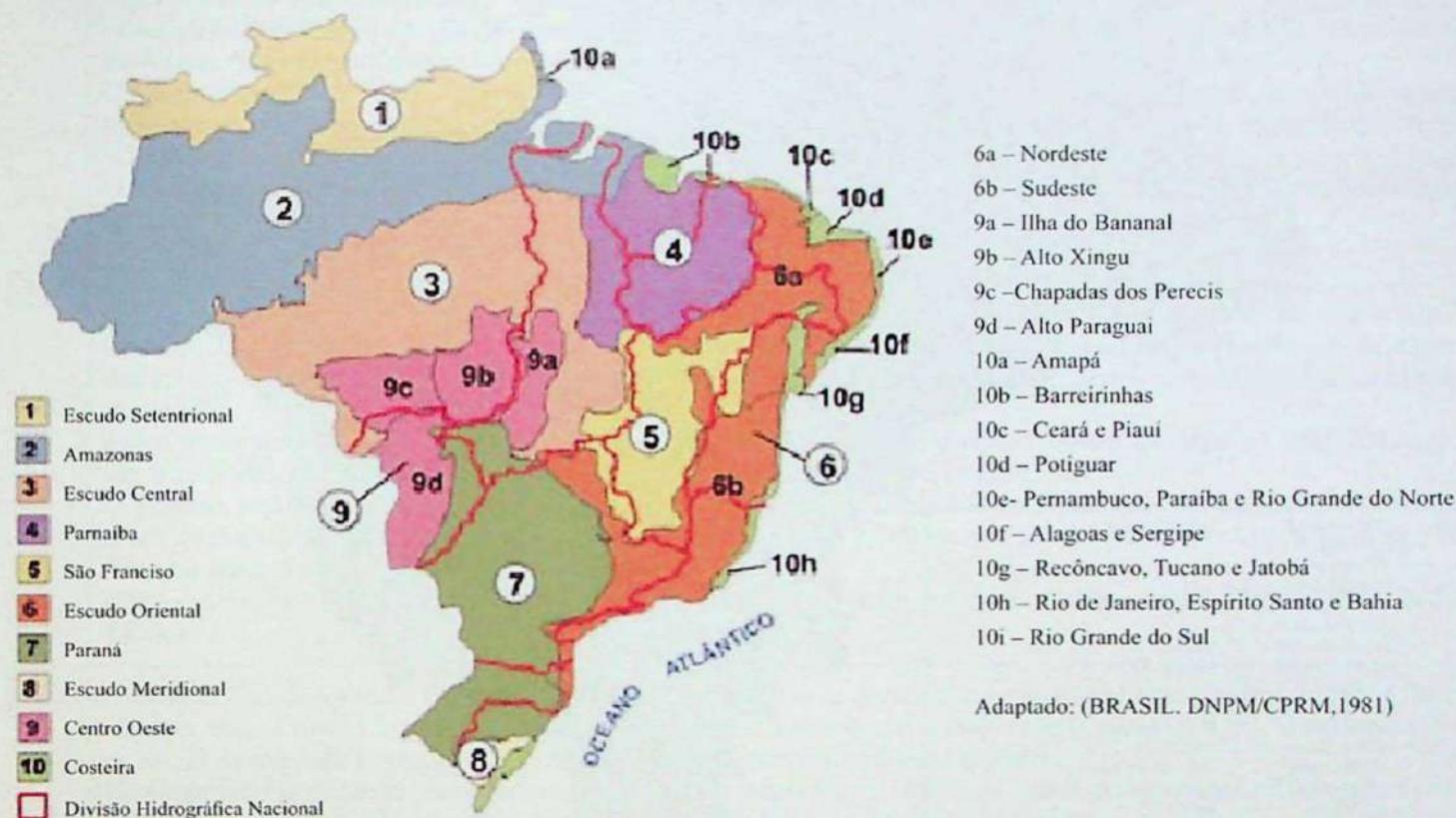
*DESCRIPÇÃO SUCINTA DAS PROVÍNCIAS HIDROGEOLÓGICAS E PRINCIPAIS AQÜÍFEROS DO BRASIL***A dinâmica de reabastecimento dos aqüíferos**

Áreas de recarga A maioria dos aqüíferos são constantemente reabastecidos. O processo por meio do qual um aqüífero recebe água é chamado de recarga. A recarga na-

tural depende fundamentalmente do regime pluviométrico (quantidade de chuvas) e do equilíbrio que se estabelece entre a infiltração, escoamento e evaporação. Sendo assim, a topografia da área, a natureza do solo e a situação

atual da cobertura vegetal, têm papel fundamental na recarga dos aquíferos. Os aquíferos são reabastecidos por meio de infiltração direta das águas na superfície do solo/rocha (recarga direta). Esta infiltração ocorre em toda

PROVÍNCIAS E SUBPROVÍNCIAS HIDROGEOLÓGICAS DO BRASIL



Adaptado: (BRASIL. DNPM/CPRM, 1981)



Divisão Hidrográfica Nacional

Figura 9 - Representação esquemática das províncias hidrogeológicas do Brasil x bacias hidrográficas

superfície dos aquíferos livres ou, no caso dos aquíferos confinados, nas áreas de afloramento (áreas onde a rocha

“aparece” na superfície). Porém, existem locais em que os aquíferos não estão em contato direto com as águas

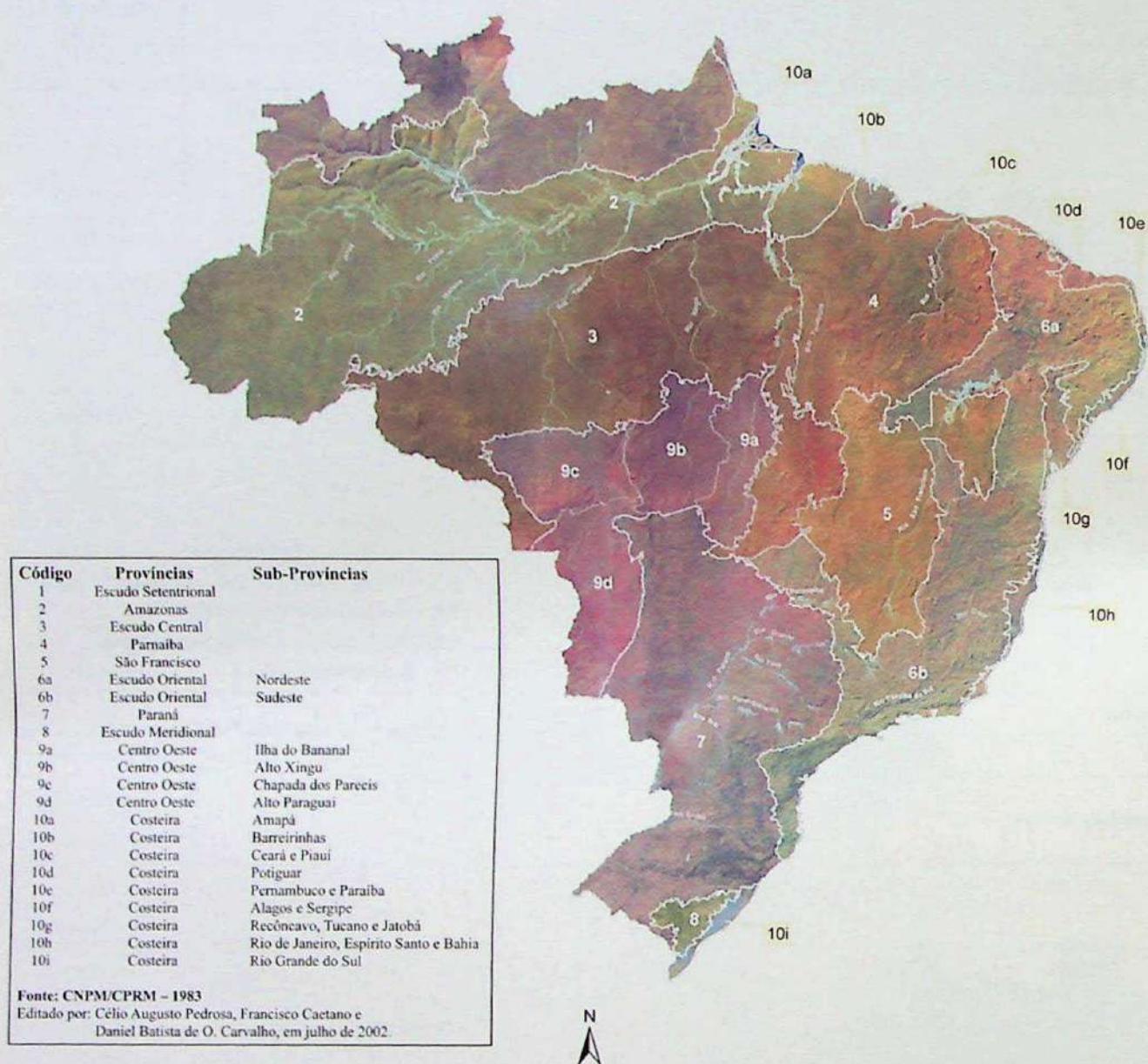


Figura 10 – Províncias hidrogeológicas e principais aquíferos do Brasil

Tabela 5 - Descrição das províncias hidrogeológicas e principais aquíferos do Brasil. Fonte: adaptado de Feitosa – (ANA, 2005), (Rebouças et al., 2002) e (SRH).

- 1 Província Escudo Setentrional – caracterizada pela ausência quase total de informações hidrogeológicas; estima-se que os aquíferos Boa Vista, Tacatu, e Grupo Roraima e Beneficente são os mais promissores, sendo formados de arenitos finos, médios e grosseiros. O Aquífero Boa Vista constitui-se de arenitos com intercalações de níveis conglomeráticos e camadas pelíticas (argila), com vazão média de 30 m³/h.
- 2 Província Amazônas – os melhores aquíferos conhecidos são os depósitos arenosos correspondentes às Formações Solimões, Içá e Alter do Chão, que apresentam bons índices de produtividade em diversas áreas, como Belém, Ilha de Marajó, Santarém e Manaus (Alter do Chão), além de Rio Branco e Porto Velho (Solimões). Os depósitos que compõem o Sistema Aquífero Solimões são arenitos, conglomerados, siltitos, argilitos e calcários siltico-argilosos, localizados no topo da seqüência sedimentar da Bacia Sedimentar Amazônica, apresentando espessura máxima total de 2.200 m. A vazão média dos poços é de 28 m³/h e profundidade média de 60 m. O Sistema Aquífero Alter do Chão ocorre abaixo da Formação Solimões, sendo constituído por arenitos e argilitos, compondo uma espessura máxima de 1.250 m. A vazão média dos poços é de 54 m³/h e profundidade média de 130 m.

Tabela 5 - Continuação.

3	Província Escudo Central – estima-se que os aquíferos mais promissores correspondem aos arenitos das Formações Beneficente e Pacaás Novos.
4	<p>Província Parnaíba – apresenta três sistemas aquíferos principais de extensão regional, Poti-Piauí, Cabeças e Serra Grande, além de outros menores tais como: Codó, Sambaíba, Corda e Itapecuru pertencentes à bacia sedimentar Parnaíba, que apresentam águas de boa qualidade química. O poço jorrante do Vale do Gurguéia – o Violeta – antes de ser tamponado, captava diretamente dos sistemas Cabeças e Serra Grande, com vazão de 1000 m³/h.</p> <p>O Aquífero Poti-Piauí é constituído por arenitos, siltitos e folhelhos, localmente calcários, apresentando espessura média de 400 m. As vazões médias nas porções livre e semi-confinada são respectivamente 18 e 40 m³/h.</p> <p>O Sistema Aquífero Cabeças apresenta o melhor potencial hidrogeológico da bacia sedimentar, apesar da espessura menor (300 m). Compõe-se de arenitos apresentando vazões médias na porção livre e confinada, respectivamente de 12 e 50 m³/h.</p> <p>O Sistema Aquífero Serra Grande engloba arenitos finos a grossos, níveis de conglomerados e intercalações de siltitos, apresentando vazões médias de 6,0 e 14 m³/h, para as poções livres e confinadas.</p>
5	<p>Província São Francisco – predominam aquíferos fraturados cársticos (Chapada Diamantina e Bambuí).</p> <p>O Bambuí ocorre na região da bacia do rio Verde Grande, e na região de Sete Lagoas- Lagoa Santa. O Sistema Aquífero Bambuí compreende os metassedimentos, em sua maioria de natureza carbonática dos Grupos Bambuí e Una, além dos carbonatos da Formação Caatinga. Os poços apresentam vazão média de 10 m³/h para uma profundidade média de 90 metros.</p> <p>Outro importante sistema aquífero é a Formação Urucuia, que abastece diversas cidades da Bahia e Goiás. Este aquífero tem uma função reguladora para o escoamento de trecho médio do rio São Francisco.</p> <p>O Sistema Aquífero Urucuia-Areado engloba sedimentos (arenitos muito finos a médios, com intercalações de conglomerados, folhelhos e siltitos) apresentando espessura máxima de 1.500 m. A vazão dos poços na camada superior é de até 60 m³/h, enquanto na inferior pode atingir mais de 600 m³/h.</p> <p>Além destes, vale citar a existência de aquíferos de menor expressão tais como: Salitre, Jacaré, Uruçuí, Mata da Corda e Paranoá.</p>
6	<p>Província Escudo Oriental (6) – ocorrem duas subprovíncias, a nordeste com potencial hidrogeológico muito fraco e a sudeste, fraco a médio. Na primeira, normalmente às vazões médias dos poços são baixas (1 a 3 m³/h) e com ocorrência de sal, já na segunda as vazões são médias (10 m³/h), com boa qualidade química.</p> <p>Na subprovíncia nordeste (6a) o reduzido potencial hidrogeológico (disponibilidade de água) está relacionada às condições deficientes de circulação das águas subterrâneas, aliadas às condições do clima semi-árido e à presença de rochas cristalinas, que resultam nas taxas excessivas de salinidade. Porém, há ocorrência de pequenas bacias sedimentares, que apresentam maior potencial, com destaque para a do Araripe, que cobre uma área de 11.000 Km², com poços de vazões da faixa de 5 a 150 m³/h para profundidade de 50 a 300 m. Na subprovíncia sudeste (6b) as condições climáticas propiciam um manto de alteração das rochas cristalinas que podem atingir várias centenas de metros de espessura, favorecendo melhores condições hídricas subterrâneas, tanto no aspecto quantitativo como qualitativo. Há a ocorrência de pequenas bacias como a de São Paulo, Taubaté e Resende, que têm sua importância associada à presença na área metropolitana de São Paulo e adjacências.</p>
7	Província Paraná – possui os aquíferos mais promissores do país, tais como o Sistema Aquífero Guarani, Bauru-Caiuá e Serra Geral e, com menor expressão, o Furnas, Ponta Grossa e Aquidauana. O Sistema Aquífero Bauru-Caiuá ocorre no topo da seqüência sedimentar da bacia do Paraná, sendo constituído por arenitos finos a médios com intercalações de argilitos e siltitos. Em algumas regiões é intensamente explotado, com vazões dos poços variando de 10 a 80 m ³ /h, constituindo se importante fonte de abastecimento público. O Sistema Aquífero Serra Geral é formado pelas rochas basálticas que recobrem o Sistema Aquífero Guarani, tratando-se de rochas cristalinas onde a água está associada à presença de fraturas, fissuras e zonas vesiculares (espaços vazios). Apresenta vazões variáveis, podendo chegar a 150 m ³ /h, sendo muito utilizado para o abastecimento nas regiões sul e sudeste. O Sistema Aquífero Guarani é, provavelmente, o maior aquífero transfronteiriço das Américas, possuindo uma área aproximada de 1,2 milhões de Km ² e estendendo-se desde a Bacia Sedimentar do Paraná (Brasil, Paraguai e Uruguai) até a Bacia do Chaco (Argentina). No Brasil ocorre nos estados de Mato Grosso do Sul, Mato Grosso, Goiás, Minas Gerais, São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. Este manancial dispõe de um volume de água de aproximadamente 37.000 km ³ , em grande parte de boa qualidade, porém, existem áreas com a presença de sais, o que pode inviabilizar alguns usos. Em alguns pontos do sistema (porções confinadas) ocorrem águas com temperaturas superiores a 30°C, que podem ser utilizadas para o turismo termal e até mesmo pela indústria. Suas vazões variam de 50 a 100 m ³ /h, com predominância entre 100 e 500 m ³ /h. Estudos recentes têm sugerido que o Guarani tem partes compartimentadas (compartimentação em blocos) e levantado dúvidas acerca de seus limites reais, especialmente na porção oriental. Neste sistema ocorrem os dois tipos de recarga: a direta nas áreas de afloramento, onde os arenitos estão em contato com a superfície; e a indireta por meio de água proveniente das fraturas das rochas da Formação Serra Geral.
8	Província Escudo Meridional – Localiza-se no extremo sul do país e apresenta alguns aquíferos, de pouca expressão, restritos às zonas fraturadas cristalinas.

Tabela 5 - Continuação.

9	<p>Província Centro-Oeste – subdivida em quatro sub-províncias: Ilha do Bananal (9a), Alto Xingu (9b), Chapada dos Parecis (9c) e Alto Paraguai (9d), com a presença de diversos tipos de rochas, tais como: metamórficas, calcários, sedimentos, etc.</p> <p>O Sistema Aquífero Parecis é constituído por arenitos com intercalações de níveis de conglomerado e camadas de argila, tendo espessura média de 150 m. Poços tubulares construídos neste Sistema apresentam vazão média de 147 m³/h e atendem a todo o sistema de abastecimento de Vilhena – RO (ANA, 2005).</p> <p>O Sistema Aquífero Pantanal, é formado por sedimentos arenosos recentes, com espessuras que podem atingir mais de 600 metros. Este sistema é responsável pela manutenção do ecossistema pantaneiro.</p>
10	<p>Província Costeira – Está dividida em nove subprovíncias: Amapá (a); Barreirinhas (b); Ceará e Piauí (c); Potiguar (d); Pernambuco, Paraíba e Rio Grande do Norte (e); Alagoas e Sergipe (f); Recôncavo, Tucano e Jatobá (g); Rio de Janeiro, Espírito Santo e Bahia (h), Rio Grande do Sul (i). Trata-se de bacias sedimentares de pequenas dimensões, com espessuras muito variáveis. Comparativamente, é a província mais ameaçada pela forma de extração das águas subterrâneas no Brasil (Rebouças, 2002).</p> <p>Os aquíferos mais promissores e bem distribuídos são os sedimentos do Grupo Barreiras, presentes em diversas subprovíncias, que abastecem Belém, Recife, São Luiz, Fortaleza e Natal. Destaca-se, ainda, na subprovíncia Barreirinhas o Marituba, que junto ao Barreiras, respondem por 80% do abastecimento público de Maceió. Na subprovíncia Ceará e Piauí ocorrem os aquíferos Beberibe e Dunas. Na Potiguar destacam-se o Jandaíra e Açu; na Pernambuco, Paraíba e Rio Grande do Norte os aquíferos Beberibe, Maria Farinha e Gramame; na Recôncavo, Tucano e Jatobá, Marizal, São Sebastião (que abastece Salvador e Camaçari), Ilhas e Tacaratu.</p>

superficiais, mas continuam a ser recarregados. Nesse caso, os aquíferos recebem água através de outras rochas (recarga indireta). As áreas de recarga direta geralmente estão localizadas em altos topográficos (morros, serras, etc) e afloramentos de rochas sedimentares. São áreas extremamente importantes para a manutenção da qualidade e quantidade das águas subterrâneas. Portanto, é fundamental que estas áreas sejam protegidas, evitando-se o desmatamento, o uso incorreto dos solos e a instalação de atividades potencialmente poluidoras.

Potencialidades dos aquíferos De forma geral, as rochas sedimentares constituem os melhores aquíferos em termos de produtividade de poços e reservas hídricas. Os terrenos sedimentares ocupam cerca de 4.130.000 km² da área do território nacional, ou seja, aproximadamente 48% do total, com boa distribuição, ocorrendo na maioria das regiões hidrográficas. Deste total, 2.761.086 km² correspondem à área de recarga dos principais sistemas aquíferos do país. A ampla presença de bacias sedimentares no território brasileiro, aliadas as condições climáticas favoráveis denota grande potencial para a água subterrânea. A seguir são apresentados as principais bacias sedimentares brasileiras e os sistemas aquíferos mais importantes dessas áreas. A abordagem da disponibilidade de água subterrânea no Brasil consta inicialmente de comentários de ordem geral sobre os terrenos sedimentares (bacias sedimentares) e cristalinos, relativamente às diferenças desses no que tange, especialmente à potencialidade hidrogeológica, diretamente vinculada à natureza geológica e ao clima (Figura 11). Em seguida, é apresentada uma descrição sucinta dos principais sistemas aquíferos sedimentares e para alguns sistemas cársticos e/ou fraturados em relação à produtividade de poços e reservas explotáveis.

A disponibilidade de águas subterrâneas dos principais sistemas aquíferos do país é apresentada na Tabela 2, assim como as regiões hidrográficas dominantes, o tipo de

aquífero (poroso, fraturado, fraturado-cárstico; livre ou confinado), a espessura média, a área de recarga e a precipitação média sobre ela.

Em termos de gerenciamento de recursos hídricos, os aquíferos apresentam uma característica singular que é de que a sua extensão não se restringe à uma bacia hidrográfica, como visto na Figura 11 e 12. A Tabela 8 apresenta a distribuição das áreas de recargas dos aquíferos nas 12 regiões hidrográficas do país. Para exemplificar, consideremos o caso do aquífero Serra Geral, que ocupa uma expressiva área da região hidrográfica do Uruguai (80%) e ocorre ainda nas regiões hidrográficas do Paraguai e Paraná, nas quais ocupa respectivamente, 3,1% e 23,9% das áreas totais. Na Tabela 9 são consideradas apenas as áreas de recarga dos aquíferos. As atividades de gerenciamento



Figura 11 - Principais domínios sedimentares (em verde) e cristalinos (amarelo) - ANA/Petrobrás – disponibilidade e demanda recursos hídricos, 2007.

to de recursos hídricos subterrâneos deverão considerar, além das áreas de recarga e as questões de vulnerabilidade e de necessidade de proteção, as porções não aflorantes e confinadas dos aquíferos. Como exemplo, podemos citar o sistema aquífero Guarani, que possui uma pequena área de recarga (área aflorante) na região hidrográfica Atlântico Sul (1,5%), mas uma grande porção em que apresenta condições confinadas pelo sistema aquífero Serra Geral (área não aflorante). A sua extensão nessa região hidrográfica, portanto, é ainda maior do que aquela apresentada considerando-se apenas a área de recarga.

RESERVAS E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS No Brasil, da mesma forma que em outras partes do mundo, a utilização das águas subterrâneas tem crescido de forma acelerada nas últimas décadas, e as indicações são de que essa tendência deverá continuar. A comprovar esse fato temos um crescimento contínuo do número de empresas privadas e órgãos públicos com atuação na pesquisa e captação dos recursos hídricos subterrâneos. Também é crescente o número de pessoas interessadas pelas águas subterrâneas, tanto nos aspectos técnico-científico e sócio-econômico como no administrativo e legal.

As águas subterrâneas, mais do que uma reserva de água devem ser consideradas como um meio de acelerar o desenvolvimento econômico e social de regiões extremamente carentes, e do Brasil como um todo. Essa afirmação é apoiada na sua distribuição generalizada, na maior proteção às ações antrópicas e nos reduzidos recursos financeiros exigidos para sua exploração.

Conhecer a disponibilidade dos sistemas aquíferos e a qualidade de suas águas é primordial ao estabelecimento de política de gestão das águas subterrâneas.

No Brasil, os estudos das águas subterrâneas sempre estiveram mais vinculados à investigação geológica que à hidrológica. A hidrogeologia tem sido tratada mais como

uma ciência da terra do que da água. Isso se deve, provavelmente, a uma política de utilização das águas voltada quase que exclusivamente para os recursos de superfície e a uma organização gerencial que separa as águas superficiais das águas subterrâneas.

Vários autores têm realizado estudos de avaliação das reservas hídricas subterrâneas em níveis nacional, regional e estadual. Entre eles, são freqüentemente citadas as determinações realizadas por Rebouças & Gaspary (1966) para a região Nordeste, e Rebouças (1988) para os vários domínios aquíferos do Brasil e para a bacia do Paraná (1976). Entre os estudos regionais de quantificação de reservas destacam-se ainda os realizados por Costa (1994) e Mente et al. (1994). As metodologias adotadas são semelhantes, com algumas modificações relativas aos índices utilizados.

A exploração de água subterrânea está condicionada a três fatores:

- quantitativo - ligado à condutividade hidráulica e ao coeficiente de armazenamento dos terrenos;
- qualitativo - influenciado pela composição das rochas e condições climáticas e de renovação das águas;
- econômico - que depende da profundidade do aquífero e das condições de bombeamento.

As reservas temporárias correspondem ao escoamento de base dos rios, ou seja, às reservas reguladoras dos sistemas aquíferos. A relação entre o volume do escoamento natural e as reservas permanentes constitui o coeficiente de realimentação, importante na definição das condições de exploração. As reservas exploráveis, ou reservas hídricas, correspondem ao volume de água que se pode extrair anualmente do aquífero sem provocar resultados indesejáveis. O seu valor é obtido somando às recargas anuais um percentual, normalmente de 20%, das reservas permanentes, a ser utilizado por um período de 50 anos.

A avaliação dos recursos de água subterrânea do Brasil, por falta de maior precisão dos estudos locais, ainda é muito aproximativa. O valor das infiltrações é determinado a partir da vazão do escoamento de base. Ela é rápida nas bacias que drenam o cristalino da região Nordeste (cerca de 33 horas) e demorada nos demais domínios (vários meses e mesmo interanuais). O escoamento de base das reservas hidrogeológicas tem sido estimado entre $5.103 \text{ m}^3/\text{ano}/\text{km}^2$ e $250.103 \text{ m}^3/\text{ano}/\text{km}^2$ e o coeficiente de renovação para o conjunto das bacias, em cerca de 10^{-3} .

Nos terrenos sedimentares, os volumes acumulados até uma profundidade de 2.000m, considerando 1/3 produtivo, é da ordem de $1.021.012 \text{ m}^3$ (Rebouças, 1988). Esse volume, todavia, está distribuído irregularmente, sendo que mais de 81% encontram-se estocados apenas em duas bacias: do Paraná e do Amazonas.

Estima-se em mais de 200.000 o número de poços tubulares em atividade no Brasil, utilizados para diversos fins, como a irrigação, a pecuária, o abastecimento de indústrias, os condomínios etc. O maior volume de água ainda é, todavia, destinado ao abastecimento público. O número de poços perfurados por ano é estimado em 12.000, o que



Figura 12 - Área de recarga dos principais sistemas aquíferos do país – ANA – disponibilidade e demanda recursos hídricos, 2005

Tabela 9 - Distribuição das áreas de recargas dos aquíferos nas regiões hidrográficas do país – ANA – disponibilidade e demanda re-cursos hidricos, 2005.

Região Hidrográfica	Sistema Aquífero (porcentagem da área de recarga do aquífero em relação a área da região hidrográfica)
Amazônica	Solimões (11,8%) – Alter do Chão (7,5%) – Parecis (2,1%) – Boa Vista (0,4%) – Barreiras (0,3%)
Tocantins/Araguaia	Barreiras (6,4%) – Itapecuru (5,0%) – Poti-Piauí (3,4%) – Bambuí (3,2%) – Alter do Chão (2,6%) – Urucuia-Areado (2,3%) – Ponta Grossa (1,2%) – Corda (0,9%) – Fumas (0,9%) – Cabeças (0,6%) – Guarani (0,4%) – Bauru-Caiuá (0,2%) – Motuca (0,1%)
Atlântico Nordeste Ocidental	Itapecuru (58,0%) – Barreiras (8,5%) – Corda (7,4%) – Motuca (1,7%) – Serra Grande (0,1%)
Parnaíba	Poti-Piauí (25,7%) – Cabeças (8,7%) – Serra Grande (8,5%) – Urucuia-Areado (2,2%) – Corda (1,9%) – Barreiras (1,8%) – Motuca (1,5%) – Exu (0,2%)
Atlântico Nordeste Oriental	Barreiras (12,5%) – Jandaíra (4,0%) – Açu (1,3%) – Exu (1,0%) – Serra Grande (0,6%) – Missão Velha (0,4%) – Tacarau (0,3%) – Beberibe (0,1%)
São Francisco	Bambuí (22,4%) – Urucuia-Areado (18,2%) – Marizal (0,8%) – Exu (0,5%) – Tacaratu (0,4%) – Inajá (0,1%) – São Sebastião (0,04%)
Atlântico Leste	Barreiras (8,0%) – Marizal (3,6%) – São Sebastião (1,7%) – Bambuí (1,1%)
Altântico Sudeste	Barreiras (2,6%) – Furnas (0,1%)
Altântico Sul	Serra Geral (27,0%) – Guarani (1,5%)
Uruguai	Serra Geral (80,0%)
Paraná	Bauru-Caiuá (38,0%) – Serra Geral (23,9%) – Guarani (3,1%) – Bambuí (0,6%) – Furnas (0,5%) – Ponta Grossa (0,2%)
Paraguai	Guarani (8,9%) – Bauru-Caiuá (4,3%) – Furnas (3,2%) – Serra Geral (3,1%) – Ponta Grossa (2,9%) – Parecis (1,8%)

pode ser considerado irrisório diante das necessidades de água potável das populações e se comparado com outros países. Os estados com maior número de poços são: São Paulo (40.000), Bahia, Rio Grande do Sul, Ceará e Piauí.

Ao reduzido número de poços tubulares, relativamente ao tamanho da população e à dimensão territorial do país, soma-se a sua distribuição irregular no espaço, com densidade por estado variando, na região Norte, entre de 1,8 hab/km² (RO) a 6,1 hab/km² (RR); na região Nordeste com valores de 12,1 hab./km² (PI) a 109,4 hab/km² (AL); na região Centro Oeste de 3,2 hab/km² (MT) a 423,3 hab/km² (DF); na região Sudeste de 32,9 hab/km² (MG) a 352,9 hab/km² (RJ) e na região Sul de 37,6 hab/km² (RS) a 61,5 hab/km² (SC) - IBGE 2007. Essas densidades são pouco representativas se considerarmos que a grande maioria dos poços se encontra nas sedes municipais, principalmente nas maiores. A utilização da água subterrânea no meio rural é, de um modo geral, pouco representativa.

Em algumas zonas, todavia, as águas subterrâneas já são intensamente aproveitadas e constituem o recurso mais importante de água doce. Mesmo em casos de elevado teor salino, como nas áreas de ocorrência dos sistemas aquíferos fissurados do semi-árido nordestino, constituem, não raro, a única fonte de suprimento de água permanente.

O crescente uso das águas subterrâneas deve-se ao melhoramento das técnicas de construção de poços e dos métodos de bombeamento, permitindo a extração de água em volumes e profundidades cada vez maiores e possibilitando o suprimento de água a cidades, indústrias, projetos de irrigação etc., que, pelo porte, eram impossíveis na prática. Relacionam-se como fatores desencadeadores do uso das águas subterrâneas a crescente oferta de energia elétrica e a poluição das fontes hidrálicas de superfície, cujo

uso está exigindo a disponibilização de recursos financeiros em quantidades cada vez maiores.

A caracterização dos reservatórios, as reservas, as disponibilidades e as condições de utilização das águas subterrâneas são discutidos com maiores detalhes no item seguinte.

Os mananciais subterrâneos ainda são utilizados na região, embora em quantidade pouco significativa quando comparada a outras regiões, no abastecimento de indústrias, hotéis, condomínios, irrigação etc., principalmente de forma suplementar às necessidades.

A GESTÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

Arcabouço institucional e legal da gestão das águas subterrâneas A primeira lei que dispôs sobre águas no Brasil foi o Decreto Lei nº 22.643/34 chamado Código das Águas que constitui um marco no gerenciamento de recursos hídricos no Brasil, onde as águas podiam ser públicas ou privadas. Na Constituição Federal de 1988 as águas passaram a ser de domínio público, isto é, todos têm direito ao seu uso. Nesta nova visão, foram estabelecidos dois domínios: da União (corpos de água que atravessam mais de um estado e/ou país) e dos Estados. Esta norma legal estabelece, ainda, que as águas subterrâneas são de domínio estadual. A Lei de Águas (Lei nº 9433/97) estabeleceu a Política Nacional de Recursos Hídricos e o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos – SINGREH, tendo os seguintes fundamentos: a água é um bem de domínio público; um recurso natural e limitado, dotado de valor econômico; em situações de escassez, o uso prioritário é o consumo humano e dessedentação animal; uso múltiplo das águas deve ser proporcionado e a

gestão descentralizada e participativa. Entre os objetivos da política destaca-se a utilização racional e integrada das águas, tendo como unidade de gerenciamento a bacia hidrográfica. Alguns estados possuem, além das leis estaduais de recursos hídricos, regulamentações dos instrumentos de outorga de direito de uso e cobrança pelo uso da água, bem como, normas que tratam da proteção das águas subterrâneas e da sua gestão.

ALGUMAS ESTRATÉGIAS DE PROTEÇÃO, CONSERVAÇÃO E GESTÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

Pelo exposto, observa-se que a Lei de Águas, bem como outros diplomas legais visam o estabelecimento da gestão de recursos hídricos de forma mais integrada possível. Uma abordagem integrada pressupõe a utilização e gestão coordenada da água, solo e recursos relacionados, a fim de maximizar o bem estar econômico e social resultante, de maneira equitativa sem comprometer a sustentabilidade de ecossistemas vitais, incluindo o desenvolvimento coordenado e o gerenciamento das águas superficiais e subterrâneas, bacias hidrográficas, seus ambientes adjacentes costeiros e marítimos e os interesses a montante e a jusante (GWP, 2006). Neste sentido, uma efetiva gestão integrada e proteção dos aquíferos compreende:

- A confecção e atualização de mapas de vulnerabilidade de aquíferos, com identificação das fontes poluidoras potenciais, integrados à gestão de uso e ocupação do solo.
- A inserção das águas subterrâneas nas políticas federais e estaduais de recursos hídricos.
- O estabelecimento de legislação de proteção das águas subterrâneas e inserção na gestão integrada dos recursos hídricos.
- A educação ambiental voltada para a proteção das águas subterrâneas.
- O estabelecimento de perímetros de proteção, normas construtivas para poços tubulares profundos e fiscalização da construção e operação dos mesmos.
- O monitoramento da qualidade e da quantidade das águas subterrâneas.
- O acompanhamento das áreas contaminadas e o cadastramento de fontes poluidoras.
- A remediação (processo de despoluição e minimização dos impactos negativos) das áreas contaminadas.
- A fiscalização e o acompanhamento dos lançamentos de efluentes e da disposição de resíduos.
- O reconhecimento da água subterrânea como um recurso estratégico, incentivando sistemas de abastecimento mistos.

Além disso, este processo deve contar com a participação de toda a sociedade, que pode ajudar a proteger as

águas subterrâneas com atitudes simples, como:

- Antes de perfurar um poço deve-se procurar o órgão estadual de recursos hídricos, visando obter informações sobre normas técnicas para a perfuração e exigências para a regularização de poços tubulares (autorização para perfuração, licença ambiental e outorga de direito de uso).
- Contratar empresas idôneas de perfuração, que possuam: Responsável Técnico, Registro no CREA e Atestado de Capacidade Técnica.
- Exigir que a empresa de perfuração apresente a Anotação de Responsabilidade Técnica (ART) e realize: teste de bombeamento de 24 horas, análise físico-química-bacteriológica, desinfecção e devidas medidas de proteção sanitária do poço, além de Relatório Técnico Detalhado (contendo, no mínimo: descrição das amostras, interpretação do teste de vazão e descrição dos materiais aplicados e quantidades). Esses documentos são necessários para solicitar a licença e outorga do poço tubular profundo.
- Perfurar poços tubulares profundos somente em casos de extrema necessidade.
- Destinar a água proveniente dos poços tubulares profundos para fins mais nobres (por exemplo, consumo humano) utilizando esse recurso com racionalidade.
- Realizar, periodicamente, as análises da qualidade da água e a manutenção de rotina dos poços.
- Lançar esgoto somente na rede pública de esgotamento sanitário, não na rede de águas pluviais.
- Perfurar poços somente em locais com boas condições sanitárias, longe de fossas, lixões, criadouros de animais e áreas de cultivo.
- Respeitar sempre a legislação e as normas municipais de uso e ocupação do solo, procurando participar da sua elaboração (Plano Diretor, Zoneamento Ambiental, Econômico-Ecológico, Lei de Uso e Ocupação do Solo, Código de Posturas Urbanas e Estatuto da Cidade).
- Evitar a impermeabilização das áreas externas, optando-se, sempre que possível, por jardins, gramados ou hortas (como forma de facilitar a infiltração da água de chuva no solo).
- Coletar e armazenar a água de chuva das calhas dos telhados; essa água pode ser utilizada para os mais diversos fins (irrigação de jardins, limpeza de pisos, etc.).
- Aproveitar as águas já utilizadas, destinando-as para fins menos nobres (por exemplo, a água da máquina de lavar para limpeza de pisos, descarga sanitária, entre outros).
- Participar ou indicar seus representantes no Sistema Estadual de Recursos Hídricos, por meio dos comitês de bacias ou conselhos estaduais de recursos hídricos.

Referências

- ABEAS. Associação Brasileira de Educação Agrícola Superior, 1999. Águas Subterrâneas: Conceitos, reservas, usos e mitos – Brasília.
- ANA. Agência Nacional de Águas, 2005. Disponibilidades e Demandas de Recursos Hídricos no Brasil. Estudo Técnico Preliminar.
- BGR/UNESCO. Groundwater Resources of the World, Março de 2006: Transboundary Aquifer Systems. 1:50.000.000. Special Edition for the 4 th World Water Fórum, México City.
- Borghetti, N. B.; Borgghetti, J. R.; Rosa Filho, E. F., 2004. Aquífero Guarani: A Verdadeira Integração dos Países do Mercosul. Curitiba: Ed. Roberto Marinho.
- BRASIL. Constituição da República Federativa do Brasil, 1988.
- BRASIL. Política Nacional de Recursos Hídricos. Lei nº 9.433 de 08 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990 que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989.
- BRASIL. Decreto 5.776 de 12 de maio de 2006. Aprova a estrutura regimental e o quadro demonstrativo dos cargos em comissão e das funções gratificadas do Ministério do Meio Ambiente e dá outras providências.
- BRASIL. Conjunto de Normas Legais: recursos hídricos. Resoluções do CNRH. Ministério do Meio Ambiente/Secretaria de Recursos hídricos, 4 ed., Brasília: MMA, 2006.
- Feitosa, Fernando A. C. et al., 1997. Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações. Fortaleza: Serviço Geológico do Brasil (CPRM, LABHID-UFPE).
- FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS. Plano Nacional de Recursos Hídricos. Volume VIII. Recursos Hídricos na Bacia do Rio Paraguai. Brasília: SRH/FGV, 1998.
- GWP. Global Water Partnership. Police Brief. Versão em Português. Comitê Científico (TEC). Autora: Sarah Carriger, 2006.
- IBGE. Pesquisa Nacional de Saneamento Básico, 2000 e IBGE – consulta 2008 -web
- Nations World Water Development Report. World Water Assistent Programme, 576p.
- Texeira, W., Toledo. M. C. M., Fairchild, T. R. e TAIOLI, F. (Org.), 2000. Decifrando a Terra. São Paulo: Ed. Oficina de Textos.
- Rebouças, A. C., Benedito, B. Tundisi, J.G, 1999. Águas Doces do Brasil: Capital Ecológico, Uso e Conservação. São Paulo: Ed. Escrituras.
- “O Estado das Águas no Brasil - 1999” Antônio de Souza Leal Publicação: ANEEL - MMA/SRH – OMS. Editor: Marcos Aurélio Vasconcelos de Freitas
- “ÁGUA SUBTERRÂNEA” - www.meioambiente.pro.br - de Eurico Zimbres - UERJ/2000.
- Souza, J.C.S., 2004 – Captação de água subterrânea. In: Tsuttyia, M.T. (Ed). *Abastecimento de Água*, Cap.5, p. 101-153, Escola Politécnica da USP, São Paulo.

Desastres naturais: situação mundial e brasileira

*Eduardo Soares de Macedo, Fabrício Araujo Mirandola,
Marcelo Fischer Gramani & Agostinho Tadashi Ogura*

Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, São Paulo, Brasil. E-mail: esmacedo@ipt.br

Desastres naturais: situação mundial e brasileira

Eduardo Soares de Macedo, Fabrício Araujo Mirandola, Marcelo Fischer Gramani & Agostinho Tadashi Ogura

Resumo Desastres naturais têm afetado a humanidade desde os primórdios da raça humana, que tenta diminuir sua condição de vulnerabilidade, aumentando o conhecimento das ameaças e as medidas de mitigação de seus efeitos. Ao longo das últimas décadas, tem sido notada uma tendência de aumento dos danos econômicos e fatalidades humanas, principalmente em razão do aumento da população mundial ocupando regiões suscetíveis a escorregamentos, enchentes e inundações, terremotos, erupções vulcânicas e outras ameaças de grande porte. Avanços científicos e tecnológicos em áreas de conhecimento, como sensoreamento remoto e informática têm levado a uma melhor compreensão dos riscos e das medidas de prevenção para a gestão de desastres em escala global, regional e local.

Palavras-chave: desastres naturais, gestão de desastres, prevenção de desastres.

Abstract *NATURAL DISASTERS.* Natural disasters have been affecting humanity since a long time and man has growing the ways to diminish its living vulnerability conditions, by enhancing the knowledge of the hazards and the measures to mitigate their effects.

The amount of economical damages and human fatalities has been increasing in the last decades due mostly to global population growth in susceptible regions to landslides, floods, earthquakes, volcanic activities and other major hazards. Scientific and technological advances achieved in subjects such as remote sensing and information technologies have led to a better understanding of the risks and the prevention measures to disaster management in global, regional and local context.

Keywords: natural disasters, disaster management, disaster prevention.

INTRODUÇÃO Desastres naturais são companheiros inevitáveis da vida sobre o Planeta, segundo Espíndola (1992). Os fenômenos naturais (terremotos, erupções vulcânicas, inundações, tempestades (furacões, tufões, ciclones, tornados), movimentos de massa, temperaturas extremas, etc.) são parte da dinâmica do planeta, e a humanidade luta e convive com eles desde o início de sua história. No século XX, o crescimento da população mundial se traduziu na ocupação de grandes áreas, incluindo aquelas suscetíveis aos fenômenos naturais. A partir daí, passa a ocorrer o que Euclides da Cunha reconheceu quando escreveu "Os Sertões": o homem como um agente geológico notável. E esse agente passou a modificar a paisagem de tal maneira que, em alguns casos, acelerou o desenvolvimento dos fenômenos naturais, dentro daquilo que se convencionou chamar de processos induzidos, influenciando na deflagração de deslizamentos, inundações, desertificação ou sismos causados por reservatórios de hidrelétricas, apenas para citar alguns.

No entanto, não se trata de adotar uma atitude fatalista frente a esses fenômenos, mantendo a idéia da vontade divina ou das forças da natureza. O enfoque deve ser o de estudar e aprender, já que, óbvio está, quanto mais conhecemos os fenômenos, melhor podemos enfrentá-los e menos penosa é a convivência com eles. Sistemas de monitoramento, alerta, contingência, emergência, atendimento e recuperação são tecnicamente possíveis de se desenvolver.

Os desastres naturais provocam anualmente a morte de milhares de pessoas e prejuízos de bilhões de dólares, desestabilizando a vida de milhões de vítimas no mundo

e afetando, freqüentemente décadas de investimentos em infra-estrutura, além de agravar as disparidades sociais e econômicas.

Desastres naturais como inundações, furacões e incêndios atingiram mais de dois bilhões de pessoas nos últimos anos, gerando prejuízos superiores a 600 bilhões de dólares em todo o mundo. Estatísticas revelam um impacto maior sobre os países e as populações pobres que dispõem de poucos recursos para implementar ações de prevenção ou recuperação. Entre 1985 e 1999, 96% das fatalidades causadas por desastres registraram-se em países em desenvolvimento. Isso fica claro, quando se confrontam eventos como os terremotos com as mesmas magnitudes em São Francisco (1989), que deixou 62 vítimas e o na Armênia, em 1988, com 55 mil mortos. Embora os países e as populações mais pobres sejam os mais atingidos por desastres, os prejuízos econômicos são maiores no mundo em desenvolvimento.

O terremoto que sacudiu em 1995 Kobe, no Japão, custou mais de US\$ 100 bilhões e o Furacão Katrina, que arrasou New Orleans em 2005, pode ter atingido prejuízos da ordem de US\$ 200 bilhões, sendo considerado o desastre natural mais custoso da história. Por outro lado, prejuízos menores também atingem os países pobres, onde os danos podem representar uma considerável parcela da economia local. Nesse caso, os danos provocados pela passagem do Furacão Mitch na América Central, em 1998, foram da ordem de US\$ 8,5 bilhões, cifras superiores à soma do produto interno bruto de Honduras e Nicarágua, as duas nações mais severamente atingidas. Da mesma forma, o terremoto de Manágua (Nicarágua), em

1972, causou a perda de 100% do seu PIB.

Estudos divulgados pelo Painel Intergovernamental sobre a Mudança Climática (IPCC) mostram que somente no ano de 1994 foram registradas 225 catástrofes naturais, um aumento significativo quando comparado às 75 ocorridas em 1975. Entre 1994 e 2003, estima-se que 610 mil pessoas morreram devido a desastres e que pelo menos 2,7 bilhões foram afetadas. Alguns eventos isolados são marcantes como os mais de 200 mil mortos pelo tsunami que atingiu o Sudeste Asiático em 2004. Outros eventos recentes e dramáticos podem ser citados, como os 26,3 mil mortos do terremoto que abalou a cidade iraniana de Bam em 2003, ou os oito furacões que atingiram o Caribe no ano de 2007, sendo que, apenas um deles, o Jeanne, matou três mil pessoas no Haiti. Os estudos ainda revelam que no futuro os impactos ocasionados pela ocorrência de eventos climáticos extremos afetarão desproporcionalmente as populações pobres. Vietnã e Bangladesh, por exemplo, estão destinados a perder mais de 70 mil km² de terra, afetando cerca de 32 milhões de pessoas. Todo o litoral do Mediterrâneo é particularmente vulnerável à elevação do nível do mar, como também os litorais do Atlântico e do Golfo, nos Estados Unidos.

Espera-se que em poucos anos, mais da metade da população mundial viverá em megacidades, e isso se constitui em complexos cenários de risco a serem enfrentados. Por isso, os projetos promovidos pela Estratégia Internacional para Redução de Desastres - EIRD, tendem a reorientar o crescimento das cidades, canalizando-as para zonas de menor risco e, também, despertando a consciência na população para desenvolver sistemas de alerta antecipado diante do risco de desastres naturais.

Prevê-se que alguns fenômenos tropicais, como ciclones, tufões ou furacões aumentem em quantidade e força. Também se espera aumento no índice pluviométrico e na umidade em algumas regiões, e que a seca se estenda por outras áreas.

De fato, manifestações climáticas anômalas já podem ser observadas localmente em muitos lugares do planeta, indicando a possibilidade de mudança na condição atual de geração de eventos climáticos extremos. Ao longo dos séculos, as sociedades foram se adaptando às mudanças do clima. O que agrava esse cenário é o crescimento populacional e a extensa ocupação de áreas suscetíveis, fato que aumenta o número de pessoas expostas aos riscos.

Nas condições atuais e olhando para o futuro, o Brasil deve buscar políticas de gestão que compreendam o controle da ocupação territorial, o monitoramento dos cenários de risco e ações efetivas de redução de riscos.

Neste artigo, serão enfocados os processos de terremotos, vulcanismo, tempestades, tsunamis, inundações e movimentos de massa (deslizamentos). Esses ocorrem com freqüência na natureza, mas quando causam danos à sociedade são chamados de desastres naturais (Kobiyama, 2008). O termo desastre será aqui utilizado como uma situação em que a comunidade ou parte dela, sofre danos de tal magnitude e abrangência, que ultrapassam a sua capacidade de resposta. Desta forma, um mesmo evento pode ter pequena repercussão para uma dada região e ser bastante danoso para outra.

TERREMOTOS O terremoto (amplamente designado de abalos, sismos e tremores de terra) é um dos mais destruidores fenômenos da dinâmica interna do planeta, fato que tem proporcionado as maiores perdas humanas, políticas e sociais. Na história recente da humanidade, diversos eventos de grande magnitude vêm ocorrendo, como observado na tabela 1.

Segundo USGS (2008), terremoto é um termo usado para descrever um movimento súbito relacionado a falhamento, atividade vulcânica, atividade magmática ou outras mudanças no interior do planeta e as respectivas vibrações e irradiações da energia sísmica.

A maioria das áreas propensas à ocorrência desse fenômeno está relacionada às zonas de encontro de placas tectônicas (Figura 1). Apesar da maior concentração destes eventos se dar na região do chamado "Círculo de Fogo do Pacífico", grandes terremotos foram registrados fora desta zona, por exemplo, na cidade de Lisboa (1755) e na Basileia (1356). O terremoto de Lisboa (1755) além de atingir Portugal, a França e o norte da África, foi seguido de um devastador tsunami e incêndios, que praticamente destruíram a cidade de Lisboa.

Diferente destes eventos, o sismo de Northridge em 1994, em Los Angeles (EUA), não causou grande número de mortes, mas as perdas econômicas decorrentes foram as maiores já registradas por um terremoto nos EUA, sendo apenas as perdas seguradas da ordem de US\$ 15,5 bilhões. Da mesma forma, o terremoto de Kobe, em 1995, no Japão, apresentou perda econômica de cerca de US\$ 100 bilhões e perdas seguradas em torno de US\$ 3 bilhões. Estes foram os mais graves terremotos do mundo industrializado durante muitas décadas, apresentando pequeno número de mortes, mas grandes prejuízos econômicos.

Tais desastres podem voltar a acontecer a qualquer momento e, para agravar a situação, devido à rápida e densa urbanização, os cenários do futuro podem ser ainda mais assustadores. As cidades situadas ao longo do "Círculo de Fogo do Pacífico" são classificadas, por especialistas, como altamente expostas. Imensos prejuízos são previsíveis para a economia, para as pessoas e para o meio ambiente.

O alto valor das perdas, em todas as esferas, se deve ao fato da impossibilidade de previsão exata para este tipo de evento, além de sua prevenção e mitigação serem muito custosas. Apesar da possibilidade de se estimar a localização de tal ocorrência e até sua magnitude aproximada, a data de um futuro evento é desconhecida. Nos dias atuais, a única maneira de se obter algum número relativo à data da ocorrência, é a partir de estudos probabilísticos. No caso de São Francisco, por exemplo, há uma probabilidade de 60% da ocorrência de um sismo com uma magnitude de 6,7, ou acima, nos próximos 30 anos. Previsões a curto prazo poderiam permitir precauções maiores, como evacuações antecipadas e organizadas, mas até os dias atuais, a obtenção de uma previsão deste tipo, com dias ou semanas de antecedência, é pouco provável.

Os sismos que atingem o Brasil são de pequena intensidade, relacionados talvez à reativação de falhas. Já foram registrados abalos de intensidade 6,6 escala Richter no Mato Grosso (1955) e 6,3 no litoral do Espírito Santo (1955). Em dezembro de 2007, um sismo de escala 4,9

Tabela 1 - Principais terremotos ocorridos entre 1356 e 2008.
Fonte: atualizado de Espíndola (1992), Huber & Inbar (2002), Teixeira et al. (2001), Spignesi (2005).

PRINCIPAIS TERREMOTOS ENTRE 1356 - 2008

Ano	Local	Número de Vítimas
1356	Basiléia	?
1556	Shensi (China)	800 mil
1668	Turquia	8 mil
1730	Hokkaido (Japão)	140 mil
1755	Lisboa (Portugal)	30 mil
1737	Calcutá (Índia)	300 mil
1780	Irã	200 mil
1857	Nápoles (Itália)	11 mil
1891	Mino-Owari (Japão)	7 mil
1906	São Francisco (USA)	3 mil
1906	Chile	20 mil
1908	Messina (Itália)	70 mil
1920	Gansu (China)	200 mil
1923	Toquio (Japão)	143 mil
1927	Nanshan (China)	200 mil
1927	Nicarágua	6 mil
1932	Gansu (China)	70 mil
1933	Sanriku (Japão)	3 mil
1934	Bihar (Índia)	10,7 mil
1935	Quetta (Paquistão)	60 mil
1939	Chile	28 mil
1939	Erzican (Turquia)	33 mil
1946	Nankaido (Japão)	1,3 mil
1948	Turcomenistão	100 mil
1950	Assam (Índia)	1,5 mil
1960	Marrocos	15 mil
1970	Peru	41 mil
1972	Manágua (Nicarágua)	10 mil
1975	Haicheng (China)	10 mil
1976	Tangshan (China)	750 mil
1976	Guatemala	23 mil
1978	Irã	15 mil
1985	Cidade do México	9,5 mil
1988	Armênia	55 mil
1990	Gilan e Zanjan (Irã)	35 mil
1993	Latur (Índia)	22 mil
1995	Kobe (Japão)	5,5 mil
1998	Afeganistão	10 mil
1999	Izmit (Turquia)	17 mil
2001	Gujarat	20 mil
2002	Afeganistão	2,5 mil
2003	Bam (Irã)	26,3 mil
2005	Paquistão e Índia	80,5 mil
2006	Indonésia	6,2 mil
2008	Sinchuan (China)	Mais de 80 mil

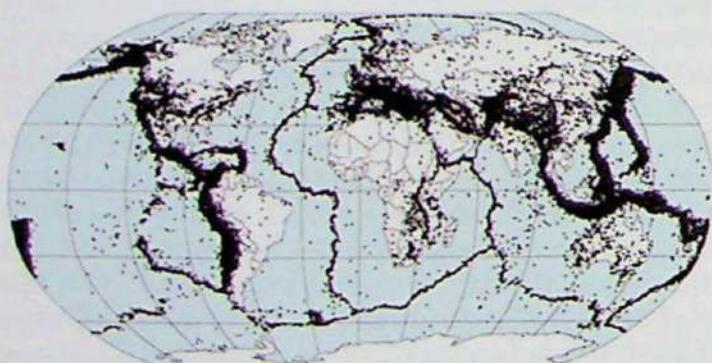


Figura 1 - Determinação dos epicentros dos terremotos ocorridos entre 1963 e 1998. Fonte: NASA (1998), a partir de dados do The National Geophysical Data Center e The National Earthquake Information Center.

atingiu a região de Itacarambi, no norte de Minas Gerais, causando a primeira vítima fatal por terremotos no Brasil. Segundo Teixeira et al. (2001) a maior parte dos epicentros registrados localizam-se no sudeste e nordeste brasileiros, o que pode ser explicado pela intensa ocupação dessas regiões e a consequente melhor notificação dos eventos. Em termos de eventos induzidos por barragens, o mais importante ocorreu em 1974, na região de Porto Colômbia (SP/MG) com intensidade da ordem de 4,2. A figura 2 mostra os epicentros dos principais eventos no Brasil.

VULCANISMO O vulcanismo é um dos mais expressivos processos associados à evolução e a dinâmica do planeta. À exceção dos raros impactos de meteoritos, pode-se afirmar que não existe outro evento natural que afete grandes áreas com tamanha intensidade, por vezes com repercuções em escala global. Dentre os maiores desastres naturais registrados na história do Planeta as erupções vulcânicas ocupam destaque especial, principalmente pelos números associados. A tabela 2 apresenta os principais eventos relacionados a erupções vulcânicas.

O cenário atual demonstra a possibilidade de novos acidentes visto que cerca de 550 vulcões são classificados como ativos e a cada ano, entre 50 e 65 entram em erupção. Na década de 90 as erupções do Pinatubo (Filipinas, 1991), Tavurvur (Papua, Nova Guiné, 1993) e La Soufrière (Saint Vincent, 1995-97) causaram prejuízos consideráveis, que chegam a atingir várias dezenas de milhões de dólares. A erupção do vulcão Pinatubo, a maior já ocorrida nos tempos modernos, causou mudanças climáticas que atingiram todo planeta, fazendo com que a média da temperatura global caísse 0,5 °C. O Etna, maior vulcão em atividade na Europa, causou enormes danos quando entrou em erupção entre 2001 e 2003. No ano de 2002,



Figura 2 – Principais terremotos ocorridos no Brasil. Fonte: Geomundo (2008), com dados do Observatório Sismológico de Brasília.

Tabela 2 – Principais erupções vulcânicas entre 1500 AC e 2008. Fonte: atualizado de Rosi et al. (2006), Huber & Inbar, (2002), Spignesi (2005).

PRINCIPAIS ERUPÇÕES VULCÂNICAS ENTRE 1500 AC - 2008		
Ano	Local	Número de Vítimas
1500 A.C.	Tora, Mar Egeo	?
79 A.C.	Vesúvio (Itália)	Sepultou Pompéia e Herculano
1631	Vesúvio (Itália)	3 mil
1783	Laki (Islândia)	10,5 mil
1792	Unzen (Japão)	15 mil
1815	Tambora (Indonésia)	90 mil
1883	Krakatoa (Indonésia)	40 mil
1902	Mont Pelée (Martinica)	38 mil
1902	Santa Maria (Guatemala)	6 mil
1919	Kelut (Indonésia)	5 mil
1951	Lamington (Nova Guiné)	3 mil
1962	Peru	3 mil
1980	Santa Helena (E.U.A.)	59
1982	El Chichón (México)	3,5 mil
1985	Nevado del Ruiz (Colômbia)	22 mil
1991	Pinatubo (Filipinas)	400
1993	Tavurvur (Papua Nova Guiné)	5
1995-97	La Soufrière (Saint Vincent)	Sem vítimas
2001/03	Etna (Itália)	Sem vítimas
2008	Chaitén (Chile)	Sem vítimas

somente a chuva de cinzas causou perdas da ordem de 800 milhões de Euros.

Os estudos mostram que cerca de 500 milhões de pessoas vivem próximas a vulcões, sendo que a maioria está assentada em grandes centros urbanos. A figura 3 ilustra a grande vulnerabilidade de algumas cidades, dada à proximidade destas com esses vulcões ativos. No Japão, por exemplo, as zonas urbanas apresentam muito alto risco de atingimento no caso de ocorrência de erupções. Para uma cidade como Tóquio, com seus 20 milhões de habitantes, uma erupção vulcânica seria catastrófica. Quando o Monte Fuji entrou em erupção pela última vez, em 1707, lançou cinzas sobre as cidades por duas semanas. As cinzas chegaram a atingir locais a 100 km de distância. Um evento como este nos dias atuais faria a paralisação das metrópoles, causando um caos político, social e econômico. Além de Tóquio, há cidades com mais de um milhão de habitantes como Nagoya, Kyoto e Yokohama que se encontram ameaçadas.

A área em torno de Nápoles (Itália) também se encontra em risco. Nos últimos séculos o Monte Vesúvio tem entrado em erupção a cada 30 anos, aproximadamente. Caso outra erupção ocorra com a mesma intensidade que em 79 a.C., estima-se que os danos causados atingiriam US\$ 40 bilhões.

Apesar da proximidade das cidades aos edifícios vulcânicos ser considerada um fator importante no dimensionamento dos possíveis desastres, há alguns casos em que esse fator foi revisto. A cidade de Auckland (Nova

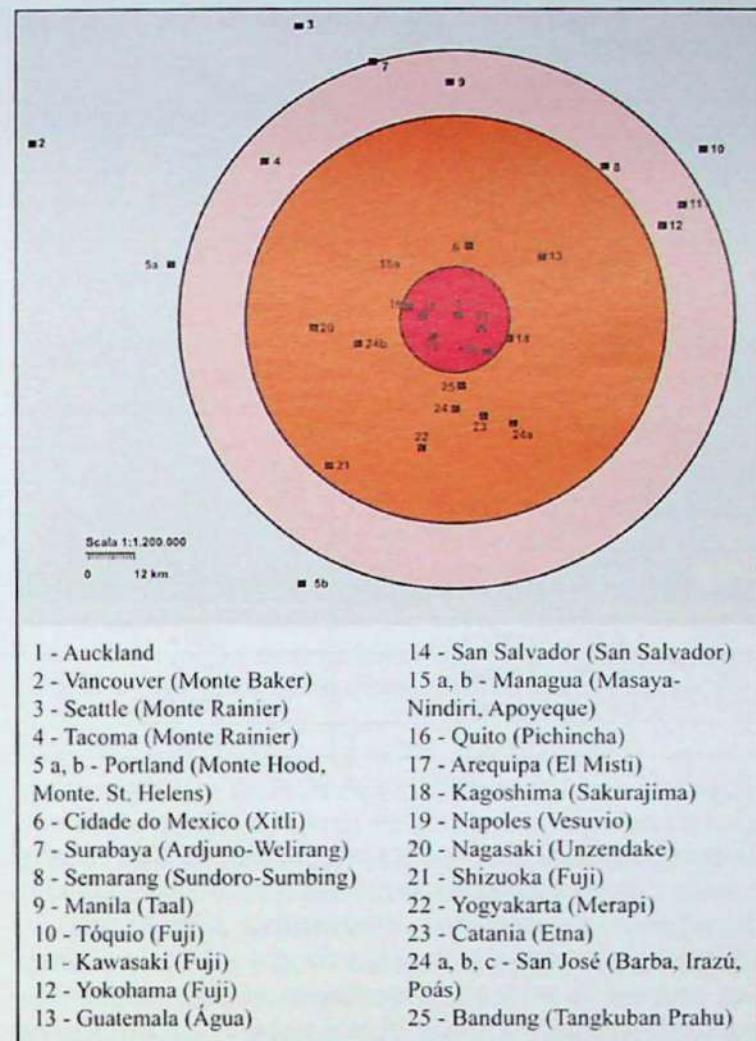


Figura 3 - Exemplo das maiores cidades próximas a vulcões ativos. Fonte: Munich Re (2008).

Zelândia), por exemplo, encontra-se em uma zona vulcânica. Mas não são os pequenos vulcões locados na zona urbana que representam o principal risco. Existem vulcões situados a cerca de 200 km a sudeste e 260 km ao sul da cidade, alguns deles altamente explosivos, como o Monte Egmont. O principal perigo para essa região seria oriundo do lançamento de cinzas, na sequência de uma erupção.

TEMPESTADES As tempestades, freqüentemente denominadas de tormentas e/ou temporais, são classificadas como uma condição climática caracterizada por intensas precipitações pluviométricas (de curta duração ou até mesmo prolongadas), podendo ser acompanhadas por ventos fortes, raios e granizo. Ressalta-se que o excesso de chuvas é o principal componente desses processos.

Devido à agressividade de suas forças, da diversidade de estragos que os acompanham, sua distribuição espacial e o número de eventos severos registrados anualmente por todo mundo, esses eventos hidrometeorológicos (ciclones, furacões, tufões, tornados, etc.) são dos desastres naturais mais temidos. A tabela 3 contém os principais eventos.

De forma geral, esses eventos possuem quatro modalidades de impacto: altos acumulados de chuva em pouco tempo, grande velocidade dos ventos, geração de grandes ondulações e a ressaca. Seu monitoramento se dá por meio

Tabela 3 – Principais eventos de tempestades entre 1780 e 2008. Fonte: atualizado de Munick Re (2008), Spignesi (2005), Huber & Inbar (2002).

PRINCIPAIS TEMPESTADES ENTRE 1780 - 2008			
Tipo de Desastre	Ano	Local	Número de Vítimas
Furacão	1780	Caribe	22 mil
Ciclone	1864	Índia	70 mil
Ciclone	1876	Bangladesh	200 mil
Tufão	1881	China	300 mil
Furacão	1900	Galveston (U.S.A)	8 mil
Furacão	1928	Flórida (U.S.A)	1,8 mil
Tufão	1958	Japão	5 mil
Ciclone	1970	Bangladesh	300 mil
Ciclone	1977	Andhra Pradesh (Índia)	10 mil
Furacão (Fifi)	1974	Honduras	10 mil
Ciclone	1991	Bangladesh	138 mil
Furacão (Mitch)	1998	América Central	12 mil
Ciclone	1999	Orissa (Índia)	7,6 mil
Tufão (Winnie)	2004	Filipinas	1 mil
Furacão (Katrina)	2005	Louisiana e Mississippi	1 mil
Furacão (Jeanne)	2007	Haiti	3 mil
Ciclone (Nargis)	2008	Mianmar	78 mil

de previsões meteorológicas com uso de satélites, radares e aviões. Estes elementos fornecem detalhes para geração de modelos que permitem a estimativa da trajetória, velocidade de translação, velocidade dos ventos e a altura das ondas e da ressaca. O conhecimento estratégico destas componentes permite a organização e a preparação de ações preventivas, visando minimizar os danos.

As tempestades possuem diversos estados de formação, sendo conhecido, primeiramente, como depressão tropical e seus ventos máximos atingem velocidades igual ou menor a 62 km/h. A fase de tormenta tropical já apresenta velocidades entre 63 e 118 km/h. O furacão é a fase superior com ventos que alcançam os 118 km/h.

O raio de ação de um furacão é variado, mas sua influência afeta territórios em um raio de 100 a 200 km. Os efeitos negativos de um evento como esse é diretamente proporcional a vulnerabilidade dos elementos sob o risco. Ocorrem danos às construções situadas inadequadamente em zonas identificadas como de alto risco, além daquelas que apresentam precariedade nos padrões construtivos, unido à falta de organização e de capacitação quanto às ações a serem tomadas em um desastre.

Este tipo de desastre natural tem se acentuado desde o final do século XIX, tanto em termos de danos materiais, como em número de mortes. Em 8 de setembro de 1900, a cidade de Galveston, no Golfo do México, foi atingida por um furacão que a destruiu por completo, causando a morte de 8 mil pessoas, mais que o dobro do terremoto de São Francisco em 1906. O ciclone Nargis atingiu Mianmar, em 2008, causando 78 mil vítimas.

Os danos causados nos Estados Unidos pelo furacão Katrina podem ter ultrapassado mais de US\$ 200 bilhões. Entretanto, os especialistas afirmam que levará anos para se calcular o custo ambiental. O poderoso furacão, acompanhado de ondas de até seis metros de altura, inundou, no dia 29 de agosto de 2005, 230 mil quilômetros quadrados

nos estados de Louisiana, Mississippi e Alabama. Além disso, alterou linhas costeiras, extermou riquezas pesqueiras, destruiu 1,75 milhões de hectares de florestas, destruiu dezenas de plataformas de petróleo e deixou uma mistura tóxica de esgoto, lixo e vazamentos de petróleo na cidade de Nova Orleans e em muitos outros lugares (Figura 4).

No Brasil não se tinha notícia de eventos tão catástroficos quanto os furacões da região do Caribe e Golfo do México até março de 2004, quando ocorreu o Furacão Catarina, que causou R\$ 212 milhões de prejuízos, 2 mortes e 2,5 mil desabrigados somente em Santa Catarina (Marcelino et al., 2004). Antes do Catarina, muitos outros eventos de ventos e chuvas fortes já haviam sido reportados envolvendo destruição de edifícios, linhas de transmissão, veículos, etc. (Blessmann, 2001).

TSUNAMIS Os tsunamis (“onda do porto”, em japonês) ocorrem após fortes terremotos, grandes deslizamentos submarinos, ou grandes deslizamentos que venham a atingir o mar, muitas vezes induzidos por sismos ou erupções vulcânicas, no mar ou na costa. A partir do ponto em meio ao mar onde ocorre o sismo, uma onda se dissipa radialmente, atingindo grandes velocidades, dependendo da profundidade da ocorrência.

O grande perigo deste tipo de desastre se deve ao seu raio de alcance. Tais ondas podem percorrer milhares de quilômetros, sem grande atenuação. Embora as ondas sejam dificilmente perceptíveis em mar aberto, elas atingem proporções gigantescas em pouca profundidade, em especial, nas baías estreitas. Regiões que não são afetadas diretamente pelo terremoto que inicia o tsunami podem ser atingidas pelas ondas, como ocorreu no Japão e Havaí, em 22 de maio de 1960, quando um tsunami foi originado por um terremoto de magnitude 9,5, ocorrido próximo à costa do Chile.

O raio de abrangência dos tsunamis se resume às regi-



Figura 4 – Vista em área de Nova Orleans afetada pelo Furacão Katrina em 2005. Fonte: Jocelyn Augustino, Federal Emergency Management Agency – FEMA.



Figura 5 – Localização do epicentro do terremoto que originou o tsunami da Indonésia (2004). Fonte: Wikimedia Commons.

ões da linha da costa. Com o rápido aumento da ocupação urbana ao longo das regiões costeiras, principalmente em regiões turísticas com seus grandes hotéis, o risco da ocorrência de prejuízos causados por tsunamis tornou-se consideravelmente elevado. A tabela 4 apresenta os principais eventos de tsunamis ocorridos entre 1755 e 2006.

Um dos mais destrutivos tsunamis no planeta ocorreu no dia 26 de dezembro de 2004, provocado pelo terremoto de Sumatra-Andaman, que alcançou a magnitude de 9,3, com rupturas na placa da Eurásia e placa Australiana, a 20 km de profundidade, que extenderam-se por cerca de 1200 km durante aproximadamente 7 minutos. Seu epicentro foi localizado a 100 km da costa oeste da região noroeste de Sumatra (Figura 5).

A decorrente onda oceânica (*tsunami*), atribuída ao forte abalo do assoalho oceânico, espalhou-se inicialmente pela Baía de Bengala e depois por todo o Oceano Índico, transformando-se em um dos mais graves desastres naturais de que se tem notícia (Figura 6).

A onda foi registrada por marégrafos em todo o globo (Figura 7). Medidas do nível do mar na costa sudeste brasileira, entre os paralelos 20°S e 30°S, mostram o efeito global do tsunami. Dois registros de estações costeiras, uma localizada no interior do estuário de Cananéia, SP, e

outra no interior da Baía da Guanabara, RJ, apresentaram oscilações atingindo 20 cm de altura. Um registro de uma estação exposta ao oceano aberto, em Ubatuba, SP, apresentou oscilações com até 1,2 m de altura.

Isto enfatiza a necessidade da existência do sistema de alerta no Pacífico e de sua ampliação para outras regiões passíveis de serem atingidas por desastres como este. Os prejuízos sociais decorrentes desse impressionante evento foram da ordem de 300 mil vítimas distribuídas pela Indonésia, Sri Lanka, Índia, Tailândia, Myanmar; Malásia, Maldivas, Seychelles, Tanzânia, Bangladesh, África do Sul, Quênia, Iêmen e pelo menos 1,5 milhões de desabrigados.

INUNDAÇÕES As enchentes e inundações representam um dos principais desastres naturais que afigem constantemente diversas comunidades em diferentes partes do mundo, seja em áreas rurais, ou em grandes metrópoles. Os primeiros anos deste século já mostraram que este tipo de catástrofe será cada vez mais recorrente.

O processo é ocasionado quando a água de chuva, ao alcançar um curso d'água, aumenta a vazão deste por certo

Tabela 4 - Principais eventos de tsunamis entre 1755 e 2006. (Fonte: atualizado de Spignesi (2005), Destefani, 2005).

PRINCIPAIS TSUNAMIS ENTRE 1755 - 2006

Tipo de Desastre	Ano	Local	Número de Vítimas
Terremoto e Tsunami	1755	Lisboa (Portugal)	30 mil
Tsunami	1775	Índia	60 mil
Tsunami	1826	Japão	27 mil
Tsunami	1883	Indonésia	36 mil
Tsunami	1896	Sanriku (Japão)	27 mil
Tsunami	1991	Bangladesh	138 mil
Tsunami	1998	Papua (Nova Guiné)	2,2 mil
Tsunami	2004	Sudeste da Ásia	158
Tsunami	2004	Noroeste de Sumatra (Indonesia)	300 mil
Tsunami	2006	Indonésia	540

período de tempo. A este acréscimo na descarga d'água, dá-se o nome de enchente. Por vezes, no período de enchente, as vazões atingem tal magnitude que podem superar a capacidade de descarga da calha do curso d'água, extra-

vasando para áreas marginais habitualmente não ocupadas pelas águas, caracterizando assim o processo de inundação (Figura 8). Além das chuvas, esse aporte de água pode ser devido ao degelo nas montanhas, aos eventos climáticos,



Figura 6 – Região de Banda Aceh (Indonésia) antes e depois da passagem do tsunami. Fonte: http://www.usc.edu/dept/tsunamis/2005/2007_sumatra/index.html.

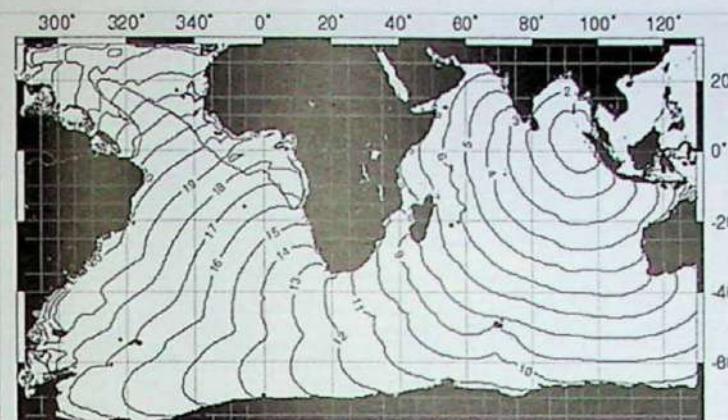


Figura 7 - Instante (horas) da chegada das ondas do Tsunami nos oceanos. Fonte: França & Mesquita (2008).

como furacões, que causam o aumento do escoamento e do nível d'água, atingindo toda a planície de inundação.

Os condicionantes naturais climáticos, geológicos e geomorfológicos de um dado local são determinantes na ocorrência de processos de enchentes e inundações. Por outro lado, a freqüência, magnitude e os fatores predponentes desses fenômenos têm também, muitas vezes, uma profunda relação com a forma e intensidade das intervenções antrópicas realizadas no meio físico, tais como impermeabilização do solo, retificação dos cursos d'água, redução no escoamento dos canais devido a obras ou assoreamento. Nas grandes metrópoles, sistemas de drenagem urbana obsoletos ou mal concebidos são, muitas vezes, os principais responsáveis por freqüentes inundações. As inundações que ocorrem ao longo de córregos e ribeirões, localizados fora do sistema principal de drenagem, geralmente têm como causas principais o grande número de bueiros e pontilhões obstruídos ou com seção insuficiente, o assoreamento dos cursos d'água decorrente do uso e ocupação inadequados do solo nas bacias, as obstruções e confinamentos dos cursos d'água provocados por construções erguidas em suas margens ou sobre eles e, de um modo geral, o aumento das vazões e volumes de cheia decorrentes da ampliação das áreas impermeabilizadas das bacias de drenagem.

O processo de inundação é regulado por eventos climáticos locais e regionais, com tempos de retorno variáveis. Tal variação faz com que algumas áreas não sejam diretamente afetadas por esse processo por um longo período de tempo. Isto permite uma intensa ocupação da população nas planícies de inundação, principalmente devido à sua morfologia extensa e plana. É esta ocupação que gera as áreas de risco em zonas de ocupação marginal e ribeirinha. A tabela 5 apresenta os principais eventos de inundações entre 1642 e 2008.

Dentre os diversos eventos mais recentes, tem destaque a inundação ocorrida em Moçambique (fevereiro de 2000), a qual, segundo o Banco Mundial, matou mais de 700 pessoas, deixando mais de 490 mil pessoas desalojadas, gerando um custo estimado em 430 milhões de dólares.

Outro grande acidente nessa mesma década foi a inundação na Polônia (julho 2001), que causou a morte de 21 pessoas e perdas de mais de US\$ 500 milhões. O aumento



Figura 8 – Inundação no Rio Pinheiros, São Paulo, afetando a linha da Companhia Paulista de Trens Metropolitanos e a Marginal Pinheiros. Fonte: acervo do Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT.

do nível do Vístula e de vários rios menores obrigou a evasão de mais de 12 mil pessoas.

Na França, 23 pessoas morreram e milhares foram severamente atingidos. Na República Tcheca aproximadamente 200 mil pessoas ficaram desabrigadas. Cidades inteiras foram encobertas pelas águas. Na Rússia, pelo menos 58 pessoas morreram nas margens do mar Negro. As inundações na Europa Central e Oriental (agosto 2002) foram descritas como “as piores inundações na Europa central em mais de um século” (Figura 9).

A inundação da Inglaterra (julho 2007), a pior dos últimos 60 anos no país, segundo a agência ambiental britânica, acarretou prejuízos que passaram dos 2 bilhões de libras.

As inundações na Índia e em Bangladesh, apenas em junho 2007, deixaram mais de oito milhões de vítimas e mais de 150 mortos, segundo balanço das autoridades. Na Índia, 112 pessoas morreram e mais de sete milhões tiveram que abandonar suas casas, sendo três milhões no estado de Bihar. Sessenta e duas pessoas morreram nesta região, segundo a agência de notícias United News of India. No Estado de Assam, 25 pessoas perderam a vida, e outras 25 em Uttar Pradesh, segundo as autoridades. Em Bangladesh, ao menos 16 pessoas morreram e mais de um milhão ficaram sem moradia. Vinte dos 64 distritos do país foram inundados. Bangladesh tem 230 rios que, a cada ano, inundam pelo menos um quinto do país. No verão de 2004 morreram 700 pessoas.

A inundação na China em junho de 2008, provocada pelas chuvas de monção, deixaram 252 mortos e 64 desaparecidos. No total, foram 50 milhões de afetados, enquanto três milhões de hectares de cultivos ficaram danificados e cerca de 200 mil casas foram destruídas.

DESLIZAMENTOS O termo genérico deslizamentos engloba uma variedade de tipos de movimentos de massa de solos, rochas ou detritos, encosta abaixo, gerados pela ação da gravidade, em terrenos inclinados.

Também referenciados como escorregamentos, os deslizamentos constituem-se em fenômenos que ocorrem naturalmente na superfície do planeta como parte do pro-

Tabela 5 – Principais eventos de inundações entre 1642 e 2008. Fonte: atualizado de Spignesi (2005); Espíndola (1992).

PRINCIPAIS INUNDAÇÕES ENTRE 1642 – 2008

Tipo de Desastre	Ano	Local	Número de Vítimas
Inundação	1642	China	300 mil
Inundação	1786	Japão	30 mil
Inundação	1828	Japão	10 mil
Inundação	1887	Huayan Kou (China)	1 milhão
Inundação	1911	Rio Yantze (China)	100 mil
Inundações	1931	China	350 mil
Inundações	1938	Nova York (E.U.A)	600
Inundação	1953	Holanda	1,7 mil
Inundação	1953	Irã	10 mil
Inundação	1955	Paquistão e Índia	1,7 mil
Inundação	1967	Rio de Janeiro (Brasil)	600
Inundação	1967	Lisboa (Portugal)	457
Inundação	1968	Gujart (Índia)	1 mil
Inundação	1971	Vietnã	100 mil
Terremoto e Inundação	1972	Nicarágua	10 mil
Inundação	1974	Bangladesh	28 mil
Inundação	1982	Argentina	sem vítimas
Inundação	1988	Bangladesh	1,3 mil
Furacão e Inundação	1998	América Central	12 mil
Inundação	1998	China	3,6 mil
Inundação	2000	Moçambique	700
Inundação	2001	Vários países da Europa	?
Inundação	2002	Vários países da Europa	?
Inundação	2004	Haiti	2,4 mil
Inundação	2004	China	1,3 mil
Inundação	2004	Bangladesh	700
Inundações	2005	China	567
Inundação	2005	América Central	1,4 mil
Inundação	2005	Vários países da Europa	80
Inundação	2006	Filipinas	200
Inundação	2007	Inglaterra	?
Inundação	2007	Índia e Bangladesh	150
Inundação	2008	Índia	74
Inundação	2008	Vietnã	151
Inundação	2008	China	252

cesso de modelagem do relevo, resultantes da ação contínua do intemperismo e dos processos erosivos. Esses processos podem ser acelerados em locais onde as ações humanas alteraram as características naturais do terreno, modificando as condições de equilíbrio existentes em um determinado tempo e local, ou gerando novas formas nas encostas, com geometria menos estável do que nas condições originais.

O mecanismo geral dos deslizamentos é condicionado por fatores (agentes) que interagem continuamente, no tempo e no espaço, sendo determinados ou afetados por eventos naturais e por interferências humanas. São eles: características de rochas, solos, relevo, nível d'água subterrânea, vegetação, distribuição das chuvas, ações antrópicas. Os principais tipos de deslizamentos são o rastejo, os escorregamentos propriamente ditos, as quedas de blocos e as corridas de massa.

Deslizamentos podem acarretar danos e perdas sociais,

econômicas e ambientais de diferentes portes e extensão. Tais danos e perdas, embora com efeitos e freqüência variáveis de local para local, afetam tanto regiões desenvolvidas como aquelas mais pobres, áreas urbanas ou rurais, e comunidades preparadas ou não para enfrentá-los. Uma das consequências mais expressivas e marcantes dos deslizamentos refere-se à perda de vidas humana. A tabela 6 mostra os principais eventos de deslizamentos ocorridos entre 1928 e 2008.

Os deslizamentos podem afetar não apenas encostas naturais, mas também taludes artificiais produzidos ou construídos pelo homem, como, por exemplo, cortes e aterros associados a obras diversas de engenharia. Da mesma forma, os deslizamentos podem se dar em depósitos de materiais lançados e/ou armazenados em superfície tais como lixo, entulho e pilhas de rejeitos derivados de mineração (Figuras 10 e 11).

No mundo inteiro, verificam-se anualmente perdas de



Figura 9 - Muitas pessoas, incluindo doentes que estavam internados em um hospital, foram evacuadas da cidade de Neu-Ulm, na Alemanha. (Fonte: BBC Brasil).

vidas humanas em decorrência tanto de escorregamentos de grande porte como de eventos mais localizados. No Brasil, as perdas dessa natureza ocorrem predominantemente em áreas urbanas, tendo tido um incremento considerável a partir da década de 1980. Tal fato é explicado pela ocupação acelerada e, na maioria das vezes, sem planejamento de áreas suscetíveis a deslizamentos, em particular nas grandes cidades e regiões metropolitanas.

A figura 12 apresenta os dados sobre o número de vítimas fatais por deslizamentos no Brasil, desde 1988, principalmente a partir de notícias na imprensa. Tais informações fazem parte do Banco de Dados mantido pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo.

Prevenção e mitigação de desastres naturais No gerenciamento de desastres naturais devem ser levados em conta dois fundamentos principais. O primeiro é a *previsão*, que possibilita a identificação dos fenômenos, das áreas de ocorrência e dos elementos sob risco. A possibilidade de previsão favorece o estabelecimento das condições e circunstâncias para a ocorrência do processo estudado. O segundo fundamento é a *prevenção*, que fornece a possibilidade de se adotar medidas preventivas que visam

Tabela 6 – Principais eventos de deslizamentos ocorridos entre 1928 e 2008. Fonte: atualizado de Spignesi (2005), Espindola (1992), IPT (2008).

PRINCIPAIS ESCORREGAMENTOS ENTRE 1928 - 2008

Tipo de Desastre	Ano	Local	Número de Vítimas
Escorregamento	1928	Santos (Brasil)	60
Corrida de detritos	1941	Huaraz (Peru)	7 mil
Escorregamento	1956	Santos (Brasil)	Mais de 100
Escorregamento	1959	Canion Madison (E.U.A.)	26
Corrida de detritos	1962	Huascarán (Peru)	4 mil
Escorregamento	1963	Represa Viont (Itália)	2 mil
Escorregamento	1966	Serra das Araras, Rio de Janeiro (Brasil)	279
Corrida de detritos	1966	Hong Kong (China)	64
Corrida de detritos	1966	Gales do Sul (Inglaterra)	144
Corrida de detritos	1967	Caraguatatuba (Brasil)	120
Escorregamento e Corrida de detritos	1970	Huascarán (Peru)	25 mil
Corrida de detritos	1970	Peru	25 mil
Escorregamento	1971	Salvador (Brasil)	104
Corrida de detritos	1974	Mayunmarca (Peru)	450
Escorregamento e Corrida de detritos	1974	Tubarão (Brasil)	199
Corrida de detritos	1985	Nevado Del Ruiz (Colômbia)	23 mil
Escorregamento	1988	Petrópolis (Brasil)	176
Escorregamento	1988	Rio de Janeiro (Brasil)	53
Escorregamento	1995	Salvador (Brasil)	32
Escorregamento	1996	Rio de Janeiro (Brasil)	44
Corrida de detritos	1999	Venezuela	20 mil
Escorregamento	2001	Petrópolis (Brasil)	45
Escorregamento	2002	Angra dos Reis (Brasil)	40
Escorregamento	2005	Guatemala	22
Escorregamento	2007	Indonésia	78
Escorregamento	2008	China	200



Figura 10 – Escorregamentos naturais generalizados ocorridos na Serra do Mar, na região de Cubatão. Fonte: acervo do Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT.

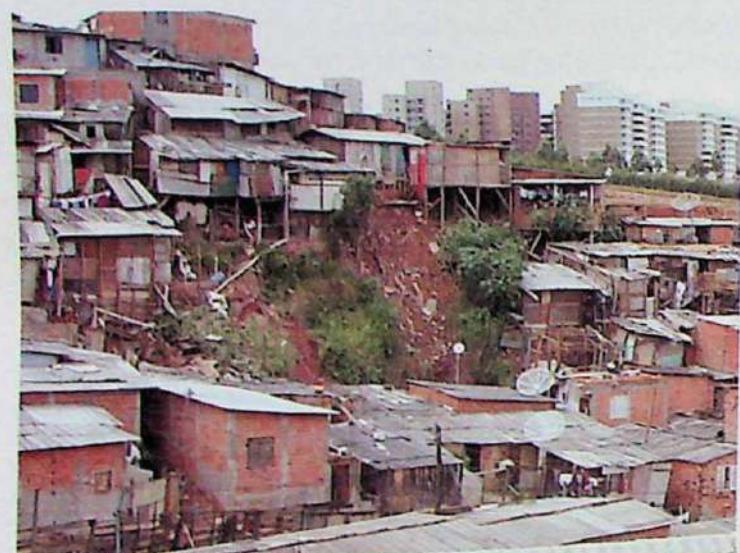


Figura 11 – Escorregamentos induzidos ocorridos em assentamento precário na cidade de São Paulo. Fonte: acervo do Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT.

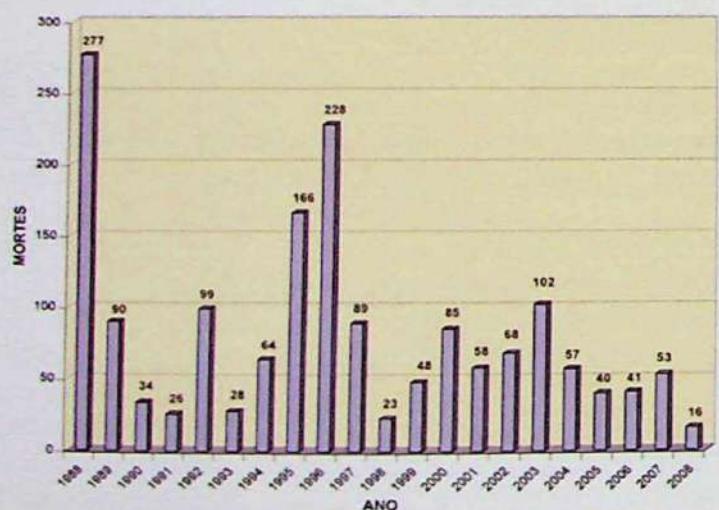


Figura 12 – Vítimas fatais por deslizamentos no Brasil, de 1988 a 2008. Fonte: IPT (2008).

reduzir ou minimizar as consequências do fenômeno.

As atividades de previsão envolvem estudos de natureza técnico-científica, incluindo um detalhado reconhecimento da fenomenologia do processo analisado, suas características, formas de ocorrência, agentes deflagradores. Ao par disso, são estudados os elementos sob risco, ou seja, tudo aquilo que será afetado pelo fenômeno, desde a população até a infra-estrutura existente, para se realizar as análises de risco. Muitos processos naturais são passíveis de previsão tanto temporal como espacial. Já existem técnicas para a elaboração de mapas de suscetibilidade para todos os fenômenos. A dificuldade está no estabelecimento de previsão temporal, ou seja, quando irá ocorrer o evento? Isso é particularmente difícil, ao menos até hoje, quando se trata de terremotos, uma lacuna do conhecimento que cientistas de todo o mundo procuram preencher e que certamente salvaria muitas vidas.

De posse dos estudos de previsão, é possível se pensar em prevenção formulando os métodos, técnicas e ações que permitirão reduzir, ou às vezes eliminar, as consequências da ocorrência de um evento.

Para o alcance dos objetivos da previsão e a prevenção, a Organização das Nações Unidas (ONU) propõe as seguintes ações: identificar e analisar os processos e riscos; estabelecer medidas de prevenção; planejar o atendimento às emergências e realizar ações de informação pública e treinamento.

As medidas de prevenção incluem obras de engenharia (medidas estruturais) e ações não-estruturais, como planejamento urbano, legislação, planos de contingência e alerta, ou seja, aquelas medidas que não envolvem a construção de aparelhos físicos. A ONU, por meio de sua Estratégia Internacional para a Redução de Desastres (EIRD) atribui maior importância a essas ações não-estruturais que permitem deter o crescimento das cidades em direção às zonas de maior risco e orientam o uso e ocupação dos espaços.

Ao par dessa ação de planejamento urbano, as medidas não-estruturais incluem os planos de defesa civil e as informações públicas. No Brasil existem planos de defesa civil estruturados para deslizamentos e inundações. No primeiro caso, pode-se citar o Plano Preventivo de Defesa Civil, no estado de São Paulo (Macedo, Ogura, Santoro 2006) e para inundações os Planos para a região do Vale do Itajaí, em Santa Catarina (Pinheiro 2007).

A existência de um sistema educativo eficaz, que gere e difunda uma cultura de prevenção, é considerado o melhor instrumento para reduzir desastres. Esse sistema deve abranger todos os níveis de ensino, com a inclusão de conhecimentos e experiências locais e soluções pragmáticas, com o intuito de serem colocadas em prática pela própria população. Devem ser elaborados e ministrados cursos, oficinas, palestras, manuais, livros, cartilhas que possibilitem a capacitação de equipes técnicas locais (prefeituras) e população. Com esse propósito, deve ser incentivada a utilização dos meios massivos de informação como rádio, televisão e imprensa escrita.

Como mostrado neste artigo, muito ainda está por ser feito em termos técnico-científicos para proteger a vida de nossas populações, ainda mais com as mudanças climáticas que afetarão, e muito, a ocorrência dos desastres naturais.

Referências

- Blessmann J. 2001. Acidentes causados pelo vento. Editora da Universidade/ UFRGS, Porto Alegre, 141 pp.
- Destefani A.D. 2005. Tsunami – a onda letal. Stop, Curitiba, 80 pp.
- Espindola J.M. 1992. Las Catástrofes Geológicas. Ciudad de México, UNAM, Cuadernos del Instituto de Geofísica 3.
- França C.A.S., Mesquita A.R. 2008. Sinal do Tsunami da Sumatra na Costa Sudeste do Brasil. Disponível em http://www.mares.io.usp.br/aagn/aagn8/cafranca/aagn_tsu.html. Acessado em 01 set 2008.
- Geomundo. 2008. Campo Minado. Onde e quando ocorreram os terremotos mais fortes. <http://www.geomundo.com.br/imagens/terremoto-brasil1.jpg>. Acessado em 01 set 2008.
- Hubp J.L. & Inbar M. (Eds.) 2002. Desastres naturales en América Latina. Fondo de Cultura Económica, México, DF, 501 pp.
- Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT. 2008. Banco de dados de mortes por escorregamentos no Brasil. IPT.
- Kobiyama, M. 2008. “Science is beautiful”: aplicação da hidrologia no gerenciamento de desastres naturais. Disponível em <http://www.pluridoc.com/Site/FrontOffice/default.aspx?module=Files/FileDescription&ID=1254&state=FVC>. Acessado em 01 set 2008.
- Macedo E.S., Ogura A.T., Santoro J. 2006. O que é um plano de contingência ou preventivo de defesa civil. In: Celso Santos Carvalho & Thiago Galvão (org) Prevenção de riscos de deslizamentos em encostas: guia para elaboração de políticas municipais. Ministério das Cidades, Brasília, p.: 76-91.
- Marcelino E.V. et al. 2004. Cyclone Catarina: intensity map and preliminary damage assessment. In: GDEN/UFSC, Simpósio Brasileiro de Desastres Naturais, I, Anais, p. 734-748.
- Munich Re. 2008. Geo Risks. http://www.munichre.com/en/ts/geo_risks/natural_catastrophes_and_risks. Acessado em 01 set 2008.
- Nasa – National Aeronautics and Space Administration. 1998. Disponível em: <http://denali.gsfc.nasa.gov/dtam>. Acessado em 01 set 2008.
- Pinheiro A. 2007. Enchente e inundação. In: Rozely Ferreira dos Santos (org) Vulnerabilidade ambiental: desastres naturais ou fenômenos induzidos? Ministério do Meio Ambiente, Brasília, p.: 95-105.
- Rosi M, Papale P., Luiji L., Stoppato M. 2006. 100 volcans actifs dans le monde. Delachaux et Niestlé S.A., Paris, 335 pp.
- Spignesi S. J. 2005. As 100 maiores catástrofes da história. Difel, Rio de Janeiro, 496 pp.
- Teixeira W et al. 2001 (Orgs.). Decifrando a Terra. Oficina de Textos, São Paulo, 568 pp.
- USGS – U. S. Geological Survey. Visual Glossary - earthquake. Disponível em: <http://earthquake.usgs.gov/learning/glossary.php?term=earthquake>. Acesso em: 01/09/2008

Geologia médica: por um ambiente mais seguro

Bernardino Ribeiro Figueiredo

*Instituto de Geociências e Núcleo de Estudos e Pesquisas Ambientais – UNICAMP - Rua Pandiá Calógeras, 51,
Cidade Universitária Zeferino Vaz Caixa Postal 6152, 13083-970 Campinas, SP, Brasil
berna@ige.unicamp.br*

Geologia médica: por um ambiente mais seguro

Bernardino Ribeiro Figueiredo

Resumo Objeto de divulgação recente, a Geologia Médica vem atraindo o interesse de cientistas e profissionais em todo o mundo e no Brasil, tendo sido incluída entre os dez temas principais do Ano Internacional do Planeta Terra (2007-2009). A Geologia Médica é uma área emergente do conhecimento, uma área de pesquisa aplicada e interdisciplinar, no âmbito da qual são investigadas as possíveis relações existentes entre fatores geológicos e a saúde de populações humanas e de outros seres vivos. Entre as várias pesquisas realizadas no Brasil são destacados os casos de contaminação ambiental e exposição humana ao arsênio, chumbo e mercúrio, citados entre as substâncias mais perigosas à saúde pública, ao lado dos radionuclídeos e de certos agroquímicos. No Brasil adquire grande importância o mapeamento geoquímico de baixa densidade, realizado apenas em poucos estados, cidades e bacias hidrográficas, regiões onde ocorrem os avanços mais significativos da Geologia Médica. O valor desses estudos e pesquisas está sendo demonstrado em vários países por meio do desenvolvimento de novos produtos minerais, benéficos à saúde, e do surgimento de novos empreendimentos nos setores de cosméticos e farmacêuticos. Por outro lado, uma grande importância pode ser percebida nas pesquisas e levantamentos geoquímicos de extensas regiões, orientados para a prevenção de doenças, com economia de recursos para os setores de saúde, pecuária e agricultura. Todas as especialidades das Ciências da Terra podem contribuir para as pesquisas de Geologia Médica principalmente por meio da construção de diálogo e trabalho conjunto com outros profissionais, em especial, os da área da saúde.

Palavras-chave: Geologia Médica, metais, ambiente, saúde humana, Brasil.

Abstract MEDICAL GEOLOGY: FOR A SAFER ENVIRONMENT With pronounced growth in recent years, Medical Geology has been attracting the interest of scientists and professionals throughout the world. For this reason the area was recognized as one of the main themes for the International Year of Planet Earth (2007-2009). Medical geology has many applications and an interdisciplinary character, within which probable relationships between geological factors and the health of populations are investigated. Among several studies carried out within Brazil, cases of environmental contamination and human exposure to arsenic, lead and mercury are discussed in this article. These substances are listed amongst the most dangerous to public health on par with radionuclides and certain agrochemicals. Several initiatives to conduct low-density geochemical mapping have been undertaken in Brazil. However, only a few states, cities and certain hydrographic basins have been covered to date. Coincidentally, the most significant advances in the field of medical geology have occurred in those mapped regions. The value of these studies is being demonstrated in certain countries by the development of new mineral products, which are beneficial to human health these creating new opportunities for cosmetic and pharmaceutical companies. Furthermore, geochemical surveys oriented to preventing illnesses can also be perceived as economically important for the health sector as well as agricultural and farm industries. All specialties of Earth Sciences can contribute towards the study of medical geology through the encouragement of effective dialogue within the Earth Science community as well as with other professionals.

Keywords: Medical Geology, metals, environment, human health, Brazil

INTRODUÇÃO: DEFINIÇÕES E CONCEITOS O interesse pela Geologia Médica é crescente em todo o mundo, em especial, nos últimos dez anos. Na virada do século, o projeto internacional IGCP 454 “*Medical Geology*” atraiu a participação de centenas de pesquisadores de muitos países e dele resultou o livro texto, referência sobre o tema, “*Essentials of Medical Geology*” (Selinus *et al.* 2005). Uma longa lista de atividades, incluindo mini-cursos, apresentações e publicações teve lugar a partir do ano 2000, abrangendo iniciativas em dezenas de países em todos os continentes. Essas atividades se realizaram sob a égide de um grupo de trabalho da comissão internacional COGEOENVIRONMENT da IUGS (*International Union of Geological Sciences*) e tempos depois sob o patrocínio da *Medical Geology Initiative* da IUGS.

Durante o 32º Congresso Geológico Internacional, re-

alizado em Florença, em 2004, foi fundada a IMGA (*International Medical Geology Association*) que passou a coordenar as discussões sobre o tema internacionalmente. Devido a todas essas realizações, a Geologia Médica foi incluída entre os dez temas principais de pesquisa e divulgação do Ano Internacional do Planeta Terra (2007-2009) com a denominação “Terra e Saúde - Por um ambiente mais seguro”.

Embora tudo isso seja muito recente, a Geologia Médica também pode ser considerada uma área do conhecimento muito antiga, visto que o conhecimento dos metais, das artes da mineração e do refino, bem como dos efeitos adversos entre os mineiros e populações expostas a substâncias tóxicas, remonta a civilizações tão antigas como a greco-romana e chinesa (Davies *et al.* 2005). Georgius Agricola (1494-1555) no seu *De Re Metallica* dedica, por

exemplo, um capítulo aos efeitos produzidos pela mineração na saúde dos mineiros. Ao longo da evolução da Geologia moderna e, mais especificamente, na primeira metade do século 20, desenvolveu-se a sub-área da Geomedicina, definida como a disciplina que estuda a relação entre excesso e deficiência de alguns elementos químicos em áreas geográficas específicas e a situação de saúde das populações locais. Também nesse período, grandes avanços ocorreram nas áreas da toxicologia experimental e da epidemiologia.

Para Selinus (2004), Geologia Médica é a disciplina que estuda a influência de fatores geológicos ambientais na qualidade da saúde humana e dos animais. Esse tratamento como disciplina talvez não satisfaça inteiramente porque a interface com a área da saúde é essencial nas pesquisas dessa nova área do conhecimento. Por outro lado, visto que os humanos não se encontram isolados dos demais seres vivos com os quais compartilham o ambiente onde habitam, talvez não seja apropriado restringir o estudo dos ecossistemas a apenas alguns de seus componentes.

A rigor não convém entender a Geologia Médica como uma especialidade das Ciências da Terra, mas sim como uma área de pesquisa interdisciplinar, beneficiária da contribuição de várias ciências, com destaque para as Ciências da Terra, Química e Medicina.

A Geologia Médica é uma área emergente do conhecimento, uma área da ciência aplicada e, portanto, interdisciplinar, que se ocupa do estudo das relações entre fatores geológicos (materiais e processos), a saúde de populações humanas e dos demais seres vivos. Esta definição é coerente com uma visão ecocêntrica da ciência face à incapacidade das abordagens antropocêntricas de gerar respostas satisfatórias para os grandes problemas do mundo atual.

A grande importância que vem sendo atribuída à Geologia Médica em todo o mundo, em período recente, pode ser explicada pelo grau de preocupações suscitadas pela crise ambiental global à qual se relacionam crescentes ameaças aos ecossistemas e agrupamentos humanos. Adicionalmente, merece consideração o fato de que as pesquisas atuais se realizam em outro patamar tecnológico, resultante dos avanços alcançados pelas técnicas analíticas e de geoprocessamento, e num mundo muito mais integrado pelas revoluções em curso nas comunicações e informática.

AMBIENTE E SAÚDE HUMANA: ALGUNS EXEMPLOS São muitos os exemplos de situações nas quais as relações entre benefícios e agravos à saúde humana e características do meio físico já estão bem estabelecidas. Pesquisas realizadas nos últimos anos e que representam temas de fronteira do conhecimento enfocam desde os efeitos das tempestades de poeiras e das erupções vulcânicas (cinzas e gases tóxicos) até o excesso ou a deficiência de iodo no ambiente (solo, água e alimento) a que se relacionam disfunções orgânicas como cretinismo e o bôcio (Fig. 1), ou ainda o excesso de flúor em água que pode induzir fluorose dental (Fig. 2) ou esquelético em humanos (BGS 2003, FAN 2007).

Estudos que apontam deficiência de selênio em solos têm sido importantes para prevenir doenças como a



Figura 1 – Bôcio contraído por efeito de deficiência de iodo (BGS 2003).

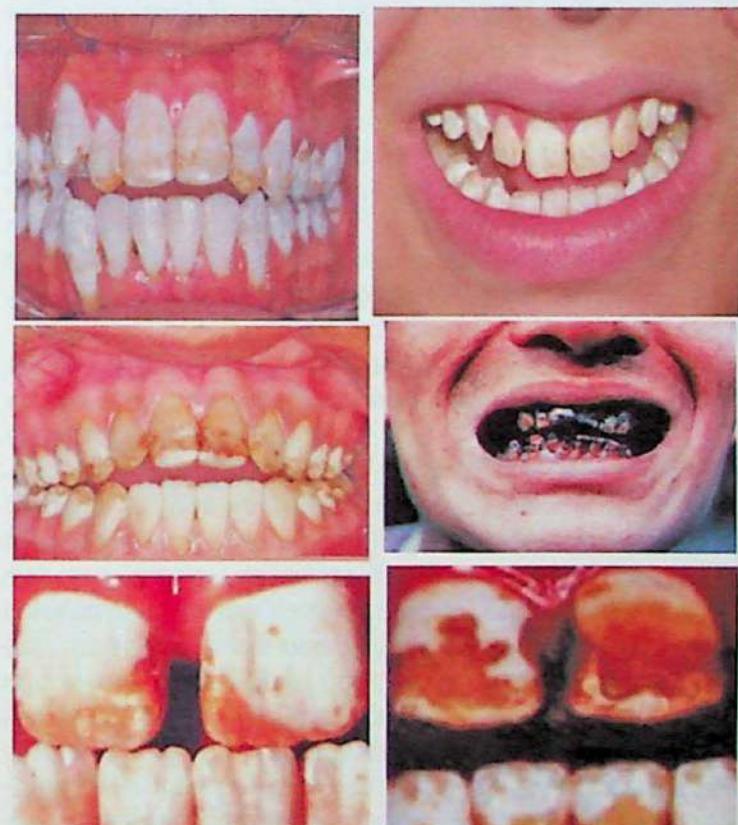


Figura 2 - Fluorose dental leve, moderada e severa (FAN 2007).

Kashin-Beck (distúrbio de formação óssea produzindo deformidades, edema de articulações, dor crônica e fraqueza generalizada) e a Keshan (doença do músculo cardíaco, miocardiopatia). Outro exemplo é o consumo prolongado de água com concentração excessiva de arsênio que pode provocar diversos agravos à saúde humana como queratose, hiperqueratose e vários tipos de câncer (Fig. 3). O caso mais famoso de arsenose foi revelado em 1998 pelo Serviço Geológico Britânico (BGS 2001), em Bangladesh, onde uma população de mais de 21 milhões de pessoas estava exposta ao consumo de água subterrânea com concentrações superiores a 50 microgramas de arsê-

nio por litro de água, muito superior ao limite de potabilidade recomendado pela Organização Mundial da Saúde de 10 µg/L As.

A exposição dos seres vivos aos vários tipos de radiação natural, derivadas dos elementos radioativos ou radioisótopos bem como a exposição ao gás radônio, constitui também objeto importante de pesquisa. Raios gama terrestres se originam do decaimento radioativo de potássio, urânio e tório, largamente distribuídos nas rochas, solos e materiais de construção. O gás radônio origina-se principalmente de minerais de urânio presentes em rochas e solos. Os efeitos produzidos pela ingestão ou inalação de substâncias radioativas podem ocasionar vários tipos de câncer, mutagênese e teratogênese (Appleton 2005).

Contudo, a Geologia Médica não se ocupa apenas de investigar as causas de efeitos adversos à saúde, mas também busca esclarecer os efeitos benéficos que podem advir da exposição de seres vivos a certos materiais naturais como rochas, minerais, areias, lamas e águas medicinais.

Um tópico que vem sendo muito pesquisado é o hábito da geofagia (ingestão de solo), bastante disseminado entre os habitantes de várias regiões do mundo incluindo muitas comunidades africanas e tribos amazônicas. Segundo Abrahams (2005) a ingestão de solos cumpre a função de satisfazer deficiência nutricional, com suplementação de ferro e outros nutrientes, por exemplo, e produzir efeitos curativos, especialmente em mulheres nos primeiros meses de gravidez. Porém, a capacidade de adsorção e de troca iônica dos solos pode trazer também, como consequência, deficiência em alguns nutrientes, ocasionando anemia e outros danos à saúde humana, além dos perigos de ingestão de certos componentes bióticos do solo.

EXPOSIÇÃO HUMANA A METAIS NO BRASIL

No Brasil, a preocupação em compreender as relações entre os parâmetros de qualidade ambiental e agravos à saúde pública é crescente. Constituem exemplos os estudos sobre arsênio, chumbo e mercúrio considerados, à parte dos elementos radioativos e certos compostos orgânicos, as substâncias mais perigosas à saúde humana na listagem da ATSDR-CERCLA (2003). Embora no Brasil ainda sejam poucos os estudos integrados do meio físico e de exposição humana a metais, as informações disponíveis para certas áreas já permitem estabelecer correlações entre parâmetros ambientais e os níveis de exposição humana. A seguir serão abordados os estudos sobre arsênio, chumbo e mercúrio no Brasil.

Arsênio Pesquisas integradas sobre arsênio foram realizadas no Quadrilátero Ferrífero (Minas Gerais), Vale do Ribeira (São Paulo e Paraná) e Santana (Amapá). Níveis baixos de exposição humana ao arsênio correlacionam-se com baixas concentrações desse elemento em água muito embora altos teores em solo, sedimentos e resíduos industriais sejam observados nessas áreas. Estes aspectos foram detalhados e analisados por Figueiredo *et al.* (2007), Deschamps & Matschullat (2007), De Capitani *et al.* (2006), Sakuma (2004), Lima (2003), Santos *et al.* (2003), Deschamps *et al.* (2002) e outros autores.

O Quadrilátero Ferrífero (MG) foi, por mais de 300

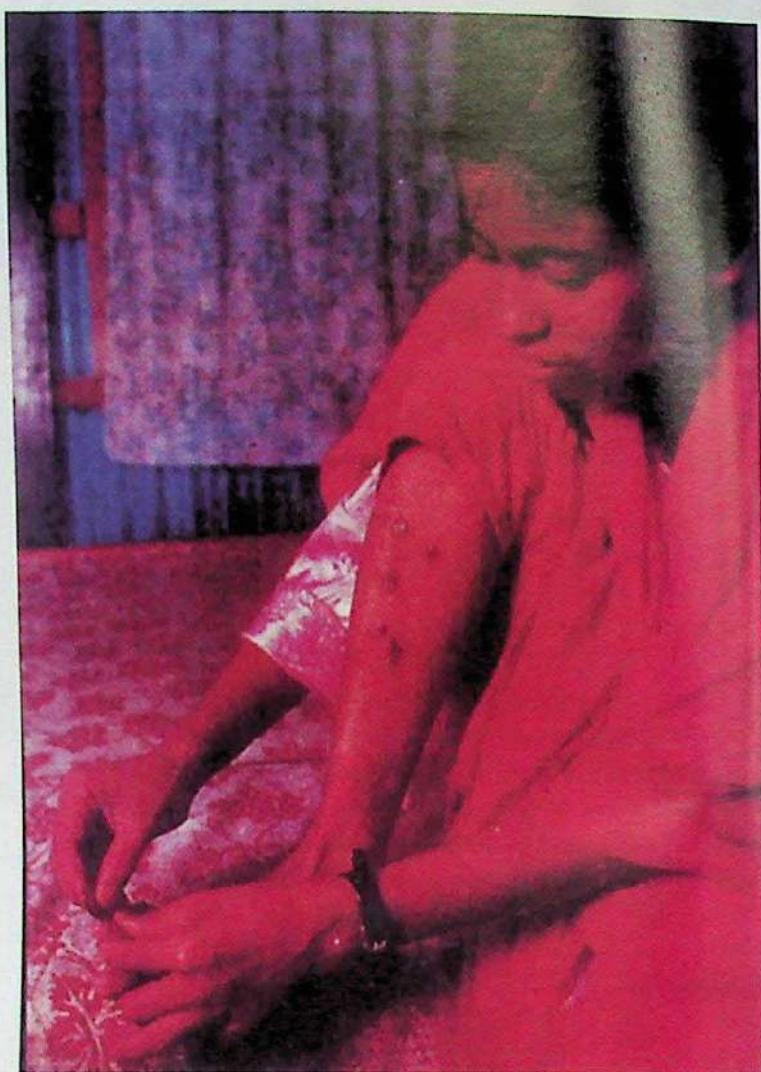


Figura 3 - Hiperqueratose provocada por exposição ao arsênio (BGS 2001).

anos, palco da maior produção de ouro do país calculada em mais de 600 toneladas. A extração, beneficiamento e metalurgia de minério de ouro rico em arsênio ocasionaram uma severa contaminação das drenagens, acumulação de rejeitos e, localmente, envenenamento de solos e águas. No Alto Vale do Ribeira (PR, SP), a dispersão de arsênio ocorreu em decorrência da lavra e refino de minério de chumbo e zinco que teve lugar durante o século 20. No médio curso do rio Ribeira de Iguape também ocorrem sedimentos de rio e estreitas faixas de solo, ricos em arsênio, que delimitam uma anomalia natural, denominada Faixa Piririca (CPRM 1982, Perrota 1996) onde não houve atividade de mineração. Essas áreas anômalas para arsênio podem ser identificadas no mapa geoquímico de sedimentos de corrente da figura 4. Em Santana, no Estado do Amapá, uma área contaminada por arsênio foi identificada às proximidades de depósitos de rejeitos resultantes do processamento de minério de manganês da mina de Serra do Navio, localizada a 300 km de distância, e que esteve ativa durante mais de 50 anos.

Em 1998, durante uma campanha de monitoramento humano, envolvendo 126 crianças (7-12 anos) em dois municípios no Quadrilátero Ferrífero, obteve-se uma concentração média de arsênio em urina de 25,7 µg/L As. Aproximadamente 20% das amostras apresentaram

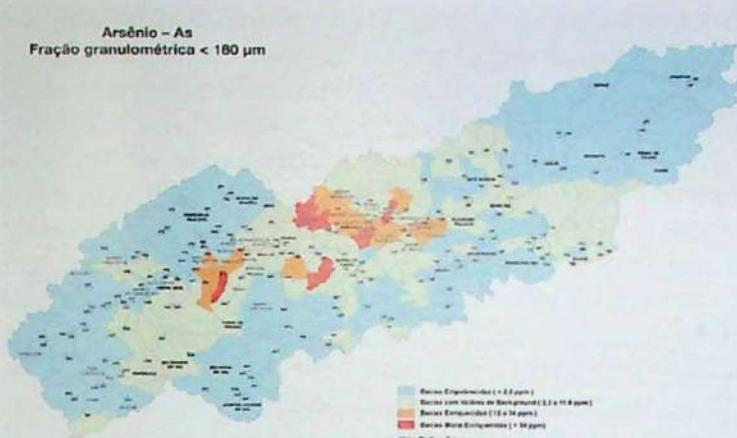


Figura 4 - Mapa geoquímico do Vale do Ribeira para arsênio em sedimento de corrente. As sub-bacias com concentrações mais elevadas em vermelho (Lopes Jr. 2005).

concentrações superiores a 40 µg/L As, limite a partir do qual efeitos adversos à saúde não podem ser excluídos em longo prazo (Matschullat *et al.* 2000). A provável via de exposição das crianças foi o contato com solo e poeira contaminados visto que as concentrações de arsênio em água de consumo doméstico, proveniente da rede pública ou de fontes naturais, eram muito baixas (inferiores a 10 µg/L As, limite recomendado pelo Ministério da Saúde, Portaria 518/2004). A população mais exposta ao arsênio na região do Quadrilátero foi identificada no município de Nova Lima. Nesse município, em nova campanha de amostragem, realizada em 2003, obteve-se uma concentração média de As em urina de 13,6 µg/L e apenas 3% das amostras superaram o limite de 40 µg/L As (Deschamps & Matschullat 2007).

No período de 1999 e 2003, várias comunidades (adultos e crianças), residentes no Alto e Médio Vale do Ribeira (PR, SP), foram avaliadas para exposição ao arsênio por meio de análise de primeira urina e os resultados revelaram concentrações medianas baixas. Os níveis médios mais elevados, de acordo com Sakuma (2004) e De Capitani *et al.* (2006), foram encontrados no bairro da Serra, município de Iporanga (SP) de 8,74 µg/L As ($n=175$), e nas comunidades de Castelhanos e São Pedro, município de Eldorado (SP), de 9,48 ($n=54$) e 11,35 µg/L As ($n=51$), respectivamente. O bairro da Serra está situado no distrito de Pb-Zn-Ag de Furnas, conhecido pela produção passada de minério rico em arsênio. Já as comunidades de Castellanos e São Pedro residem na área da anomalia natural de arsênio do Piririca. Em todas essas localidades foram encontradas baixas concentrações de arsênio em água.

Em Santana (AP) também foram encontrados níveis baixos de exposição humana ao arsênio. Amostras de cabelo foram colhidas de 512 pessoas, em 2001 e 2002, obtendo-se uma concentração média de 0,20 µg/g As e uma concentração máxima não excedendo 2 µg/g As, de acordo com Santos *et al.* (2003). Valores da ordem de grandeza de 1 ppm As em cabelo são internacionalmente aceitos como normais em populações não expostas. Os autores citados encontraram concentrações de arsênio em água de rio inferiores a 10 µg/L para a maioria das amos-

tras e concentrações inferiores a 0,5 µg/L As em água de torneira embora altas concentrações do elemento tenham sido determinadas em sedimentos de rio e solo.

Nos três casos estudados, portanto, os níveis de exposição humana não podem ser considerados elevados e, coincidentemente, as concentrações de arsênio em água de consumo humano revelaram-se também muito baixas. Não obstante, nas três áreas foram descritos passivos ambientais na forma de resíduos industriais mal dispostos, sedimentos fluviais ricos em arsênio e, mais localmente, solos envenenados. É provável que as condições físico-químicas do meio não estejam favorecendo a mobilidade do arsênio para as águas o que torna os riscos de intoxicação dessas populações bem menores do que em outras partes do mundo, como as documentadas por Smedley & Kinniburgh (2002).

Chumbo Entre os estudos sobre contaminação ambiental e humana por chumbo até agora realizados no Brasil são destacados a seguir os casos de Santo Amaro da Purificação (Bahia), Vale do Ribeira (Paraná e São Paulo) e Bauru (São Paulo). Da revisão de vários autores (Carvalho *et al.* 2003, Paoliello *et al.* 2002 e 2005, Cunha *et al.* 2005; Freitas *et al.* 2007) é possível perceber que os níveis elevados de exposição humana ao chumbo relacionam-se a fontes não pontuais (emissão atmosférica de indústrias), altos teores do metal em solo, poeira e alimentos. Em contraste, entre residentes de áreas vizinhas de fontes pontuais (minas e fábricas de bateria), com baixos teores de Pb em solo, os níveis de exposição são baixos. Os efeitos de intoxicação por chumbo podem ser anemia, irritação gástrica, disfunções dos rins, fígado e coração, danos cerebrais e retardamento mental.

Tanto em Santo Amaro (BA) como em Adrianópolis (Vale do Ribeira, PR), estiveram em operação duas plantas de refino de metal da empresa Plumbum, responsáveis pela geração de grandes quantidades de resíduos tóxicos e contaminação dos solos em áreas residenciais vizinhas. Nos arredores das plantas de Santo Amaro (Fig. 5) foram encontrados até 8.200 µg/g Pb e 117 µg/g Cd em solo (Dos Anjos 2003) e em Adrianópolis, em área vizinha à planta industrial, foram encontrados teores em solo de até 1.000 µg/g Pb (Cunha *et al.* 2005). Em ambas áreas também foram indicadas elevadas concentrações de chumbo em sedimentos fluviais e alimentos. Lamoglia *et al.* (2006) encontraram concentrações de chumbo em legumes e verduras, cultivadas pelos residentes em área próxima à Plumbum de Adrianópolis, superiores aos limites estabelecidos pelo Ministério da Saúde.

Em Bauru (SP) a contaminação ambiental foi ocasionada pela fábrica de reciclagem de baterias Ajax e os estudos revelaram concentrações elevadas, de até 1.071 µg/g Pb em solo e até 60 µg/L Pb em água de poço, apenas em amostras coletadas na área interna da indústria. Nas áreas afastadas da planta industrial foram encontrados baixos teores do metal.

Nas três áreas, descritas acima, foram realizadas avaliações de exposição humana ao chumbo usando como bioindicador a concentração de chumbo em sangue (PBS). Em Santo Amaro foram encontrados níveis muito altos de

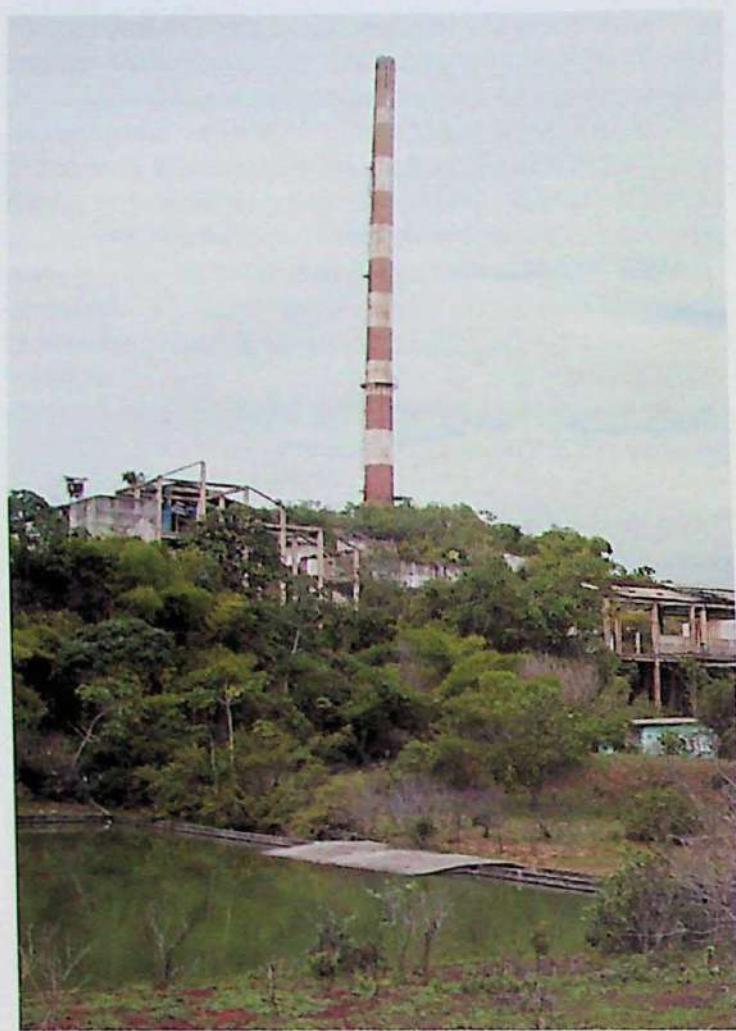


Figura 5 – Planta da Plumbum em Santo Amaro da Purificação.

chumbo em sangue em 1980 (Carvalho *et al.* 2003). Os autores analisaram um grupo de 555 crianças (1-9 anos) e obtiveram PBS médio de 59,1 µg/dL. Em duas comunidades vizinhas da Plumbum, Vila Mota e Capelinha, no Alto Vale do Ribeira, foram encontrados PBS médios em torno de 12 µg/dL entre crianças e adultos. Entre as crianças (n=94, 7-14 anos), 60% das amostras apresentaram teores superiores a 10 µg/dL, nível internacionalmente aceito como normal para crianças (CDC, 2001) e 13 % das amostras, concentrações maiores que 20 µg/dL (Paoliello *et al.* 2002 e 2003; Cunha *et al.* 2005). Finalmente, em Bauru, onde foram encontradas baixas concentrações do metal em solo habitado, as concentrações de chumbo em sangue de crianças (PBS de 7,3 µg/dL entre 850 crianças de 0-12 anos) também foram mais baixas (Freitas *et al.* 2007).

Mercúrio O mercúrio é um dos poluentes mais perigosos e mais pesquisados em todo o mundo, especialmente após a tragédia de Minamata no Japão. No Brasil, a maioria dos estudos sobre mercúrio foi realizada na Amazônia onde foi intenso o uso do metal nas regiões de garimpo de ouro (Malm 1998, Lima de Sá *et al.* 2006, Telmer *et al.* 2006).

A Amazônia corresponde a pouco menos que 60% do território brasileiro com uma população de mais de 20 milhões de habitantes compreendendo vários grupos étnicos. Na região, as fontes de mercúrio têm sido atribu-

idas aos garimpos de ouro (100 t anuais nos últimos 20 anos), desmatamento, queima de biomassa e contaminação de ambientes aquáticos como lagos e reservatórios de hidrelétricas (Veiga *et al.* 1999, Lima de Sá *et al.* 2006).

Nos ambientes favoráveis à intervenção de metanobactérias ocorre a formação das espécies orgânicas mais tóxicas (CH_3Hg^+ e $(\text{CH}_3)_2\text{Hg}$) que, em certas espécies de peixes, podem passar por um processo de bioacumulação e apresentar concentrações de mercúrio até dez mil vezes maior do que os teores em água. Os efeitos previsíveis em humanos expostos à contaminação por mercúrio são febre, edema pulmonar, pneumonite, distúrbios emocionais, anorexia, irritabilidade, fotofobia, comprometimento da memória e da função cognitiva.

Segundo Horvat (1996), concentrações de 50 a 100 µg/kg Hg em sedimentos fluviais podem ser consideradas normais. Em regiões de garimpo, entretanto, podem ser encontradas concentrações de até 1.600 µg/kg Hg como na bacia do Rio Acre (Silva, 1997). Já as concentrações de mercúrio em peixes podem variar de 200 µg/kg Hg em áreas não contaminadas até 2.000-6.000 µg/kg Hg em bacias contaminadas, excedendo largamente o limite máximo previsto na legislação brasileira de 500 µg/kg Hg (Malm 1998).

Lima de Sá *et al.* (2006) compilaram resultados de vários estudos de exposição humana ao mercúrio na bacia do Tapajós e situaram a concentração de metal em cabelo no intervalo 11,8-25,3 ug/g Hg para grupos mais expostos (5 grupos, 1.287 indivíduos, 1994-2001) e entre 4-10,8 ug/g Hg para grupos menos expostos (7 grupos, 1.644 indivíduos, 1996-2000), estes últimos comparáveis à concentração máxima tolerável de 10 ug/g Hg (WHO 1990).

Embora, a maioria dos estudos sobre mercúrio na Amazônia tenha se concentrado em regiões de garimpo (Fig. 6), pesquisas mais recentes (Fadini & Jardim 2001, Jardim & Fadini 2001) na bacia do Rio Negro, onde não ocorreram atividades industriais ou garimpeira, forneceram dados de concentrações em água superficial de 4,6-7,5 ng/L Hg, correspondente a 3 a 4 vezes o normal, no ar de 1,3 ng/m³ (cerca de 1,6 vezes o encontrado em área industrial) e em solo superficial de 172 µg/kg Hg (cerca de 4 vezes o normal), resultados comparáveis aos encontrados em alguns centros industrializados.

Do exposto é possível concluir que a dispersão de mercúrio na Amazônia não se circunscreve às regiões de garimpo mas é muito mais ampla, resultando da ação de transporte atmosférico do metal, fixação em solos ricos em matéria orgânica e ricos em ação microbólica, entre outros fatores (Malm 1998). As maiores taxas de metilação, segundo Guimarães *et al.* (1997) são encontradas em sistemas aquáticos tropicais, como a superfície de florestas alagadas sazonalmente, e nas zonas de raízes de “floating meadows” formadas pela vegetação aquática.

AVALIAÇÃO DA EXPOSIÇÃO HUMANA E OS ASPECTOS ÉTICOS Estudos de avaliação da exposição humana a substâncias tóxicas fazem parte também da área de Geologia Médica impondo-se nesses trabalhos estreita colaboração entre geocientistas e profissionais da área da saúde. Normalmente, esses estudos incluem a determinação de fontes (primária e secundária) de poluição, as rotas



Figura 6 – Mapa da Amazônia indicando as bacias dos rios Tapajós, Madeira e Negro.

dos poluentes e as vias de exposição, se inalatória, contato dérmico, ingestão de água ou alimento ou outra.

Os estudos integrados em geoquímica contemplam o monitoramento das concentrações das substâncias de interesse nos diversos compartimentos como água, sedimento, solo, ar, plantas, peixes e outros seres vivos. O uso de modernas técnicas analíticas favorece o acesso a concentrações mínimas dos elementos, da ordem de partes por trilhão, nesses materiais.

A etapa de monitoramento humano requer conhecimentos especializados das áreas de toxicologia ambiental, epidemiologia, farmácia e outras. De início, deve-se proceder à escolha de um biomarcador de exposição, previamente testado, que pode ser a concentração da substância tóxica no sangue ou urina, unha, cabelo ou até mesmo uma medida indireta de produção de uma substância específica pelo organismo. Deve ser feito também o planejamento da campanha de amostragem (se entre crianças, adultos, na escola, residências etc) bem como o detalhamento de como a coleta de amostras será executada, qual o método analítico mais adequado e como os resultados analíticos serão tratados e apresentados em relatórios.

A participação das pessoas nessas pesquisas deve ser voluntária, baseada no livre consentimento, obtido mediante esclarecimento detalhado sobre os riscos ou benefícios, que deve ser prestado sempre levando em conta a necessidade de respeitar os valores culturais e religiosos dos participantes (Fig. 7). Por outro lado, por envolver a participação de seres humanos, os projetos precisam ser previamente aprovados por um Comitê de Ética em Pesquisa, vinculado ao Ministério da Saúde, que zelará por fazer cumprir os aspectos éticos das normas vigentes de pesquisa em seres humanos, estabelecidos pelo Conselho Nacional de Saúde (Resoluções no.196 de 10/10/96, no. 251 5/8/97 e no. 292 de 8/7/99 entre outras) que visam



Figura 7 - Encontro de pesquisadores e residentes durante pesquisa em Adrianópolis em 1999.

garantir e resguardar a integridade e os direitos dos participantes das pesquisas.

O conjunto de informações gerado pelos estudos de fontes, vias e níveis de exposição pode servir de subsídio para a avaliação do risco ao qual pode estar sujeito determinado agrupamento humano. As metodologias empregadas na avaliação do risco de contaminação ambiental e humana, bem como diversos estudos de caso no Brasil, podem ser encontrados em publicações especializadas como Hacon *et al.* (1997), Castilhos *et al.* (1998) e Ebinhaus *et al.* (1999).

Comprovada a situação de risco, impõe-se formular medidas mitigadoras ou de remediação do problema as quais, normalmente, são desenvolvidas em dois níveis: assistência médica e nutricional que podem ensejar a avaliação de efeitos e sintomas de intoxicação humana; e ações de intervenção ambiental, voltadas para a eliminação ou atenuação das causas da contaminação. Em conjunto, essas ações se traduzem no que se denomina gerenciamento do risco, no qual cumprem diferentes papéis a comunidade afetada, os pesquisadores e técnicos, as autoridades governamentais, dirigentes de empresas e outros atores sociais.

Um tópico importante e muitas vezes ignorado refere-se à construção de estratégias adequadas de comunicação de risco que visam facilitar o entendimento do problema por parte da comunidade e autoridades, favorecendo assim a sua participação no gerenciamento do risco. No âmbito da comunicação de risco impõe-se também contar com a colaboração de profissionais habilitados da área das ciências sociais. Informações adicionais sobre esse tópico e cursos podem ser encontrados nas páginas da Organização Panamericana da Saúde e da *US Environmental Protection Agency*.

Covello & Sandaman (2001) resumem as sete regras da comunicação de risco defendidas pela agência americana, a saber: 1. Aceitar e envolver o público como parceiro legítimo; 2. Planejar cuidadosamente e avaliar a sua capacidade; 3. Ouvir as preocupações específicas do público; 4. Ser honesto, franco e aberto; 5. Coordenar e colaborar;

com outras fontes de informação confiáveis; 6. Considerar a mídia como aliada e atender às suas necessidades; e 7. Falar claramente e agir com compaixão.

Os fatores que podem interferir na percepção do risco pela população envolvida são diversos e efeitos negativos podem ocorrer prejudicando a participação pró-ativa da comunidade na solução do problema. Um desses fatores que não pode ser subestimado é a ação da mídia. A interferência da mídia no caso de Adrianópolis (exposição humana ao chumbo) foi investigada em maior detalhe por Di Giulio *et al.* (2008) que concluíram pela necessidade imperiosa dos pesquisadores contarem previamente com um plano de comunicação de risco que preveja os procedimentos de como lidar com a mídia.

EFEITOS BENÉFICOS DOS MINERAIS À SAÚDE HUMANA

Nos itens anteriores foram enfatizados os perigos e ameaças à saúde humana representados por alguns metais e substâncias tóxicas. Na figura 8 são mostradas as curvas típicas de dose-resposta dos elementos essenciais e não essenciais à saúde humana. A curva superior ilustra o caso de elementos e substâncias essenciais ou benéficos à saúde (ferro, cálcio, cobre etc) que cumprem função no metabolismo para doses situadas numa faixa de normalidade. A curva indica que danos à saúde podem ser causados seja por deficiência seja por excesso de dose. A curva inferior ilustra o caso de um metal ou substância (mercúrio, arsênio etc) que não cumprem nenhuma função no metabolismo e que, a partir de uma certa dose absorvida pelo organismo, podem ocasionar danos à saúde ou até a morte. Indicações sobre a classificação dos elementos químicos segundo as suas propriedades carcinogênica ou teratogênica ou embriocida podem ser encontradas em Smith & Huyck (1999).

Entre os elementos benéficos já foram mencionados antes o flúor e o iodo. A fluoretação da água potável foi adotada em vários países como proteção contra a cárie dental e o iodo foi adicionado ao sal de cozinha para proteger a população contra disfunções da tireoide (bócio). Estas ações foram propostas como medidas de saúde pública.

Ainda sobre os efeitos benéficos dos minerais merece ser citado o consumo muito difundido de produtos cosméticos e medicinais cujos princípios ativos derivam de propriedades de certos metais, minerais e rochas. O desenvolvimento de produtos minerais e a pesquisa de novas aplicações em saúde humana e de animais representam um campo promissor para a Geologia Médica. Aqui se incluem o uso de certas argilas, areias e rochas vulcânicas, águas termais, sulfurosas, radioativas e de muitos outros materiais.

As pesquisas com foco nas propriedades de novos materiais requerem o trabalho em equipes multidisciplinares, por exemplo, envolvendo profissionais da área de farmácia e clínica médica.

O MAPEAMENTO GEOQUÍMICO DE BAIXA DENSIDADE

O mapeamento geoquímico de baixa densidade tem sido divulgado nos últimos anos como uma ferramenta importante de trabalho da Geologia Médica. O levantamento da distribuição de elementos e substâncias químicas em um determinado território é considerado de

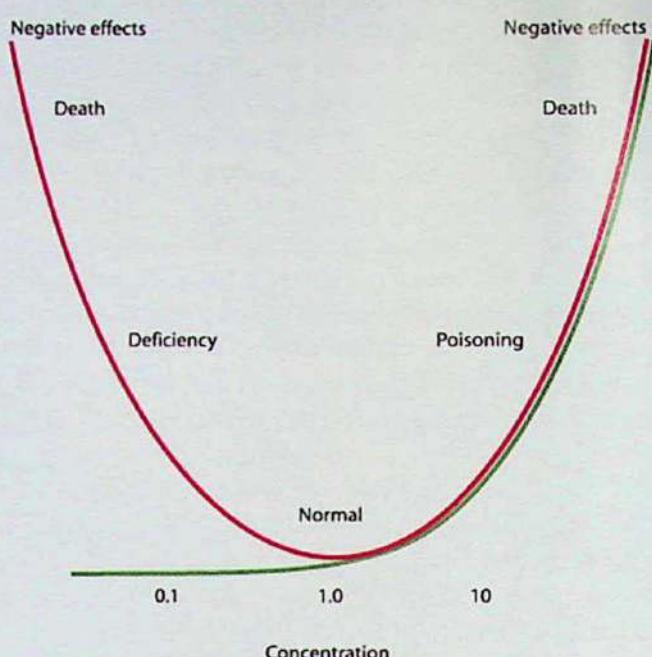


Figura 8 - Curvas dose-resposta de elementos essenciais e não essenciais (Selinus 2004).

baixa densidade por prever a coleta de um número pequeno de amostras em relação ao tamanho da área mapeada. Em cada estação de coleta podem ser recolhidos vários tipos de materiais como água, sedimento, solo biótico e abiótico, musgo e outros materiais, que são analisados posteriormente pelas técnicas analíticas multi-elementares. São assim geradas bases de dados, georreferenciados, muito robustas que servem a múltiplas aplicações: saúde pública, gerenciamento de bacias hidrográficas, zoneamento ecológico, planejamento agrícola, assistência à pecuária e exploração mineral.

Entre as experiências de mapeamento geoquímico de baixa densidade merecem destaque o Projeto *Kola Ecgeochemistry* (1992-1996) e o Projeto *Barents Ecgeochemistry* (1999-2003), ambos executados na região norte da Europa. Do projeto Kola resultou o "Environmental Geochemical Atlas of the Central Barents Region" (Reimann *et al.* 1998) que contém dados de análise geoquímica de musgo terrestre, húmus, solo superficial e horizonte C, materiais coletados em 600 estações, cobrindo uma área de 188.000 km², e analisados por 60 elementos.

Já o projeto *Barents Ecgeochemistry* (Salminen *et al.* 2004) contemplou a coleta de amostras em 1.373 estações, cobrindo uma área de 1.100 km². Foram coletadas amostras de água superficial e de chuva, musgo terrestre e solos orgânico e abiótico, que foram analisados por mais de 50 elementos, radionuclídeos e os orgânicos, PAH:s e PCB:s. A figura 9 foi extraída do material gerado por esse projeto e contém a distribuição de ¹³⁴Ce em húmus com indicação clara das anomalias positivas na área de Chernobyl e na região sul da Finlândia.

No Brasil existem também experiências localizadas de mapeamento geoquímico de baixa densidade com destaque para os mapas geoquímicos dos Estados do Rio de Janeiro e do Paraná. O Atlas Geoquímico do Estado do Paraná (Mi-

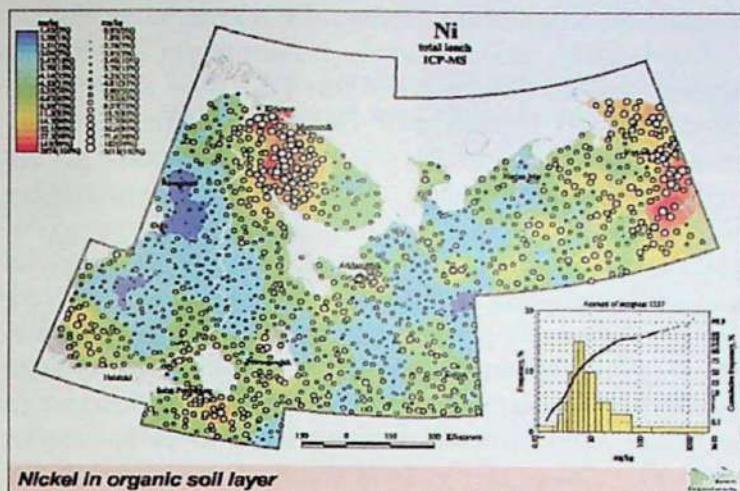


Figura 9 - Distribuição de níquel em amostras de solo orgânico, *Geochemical Atlas of the Eastern Barents Region*. As concentrações mais elevadas de metal nas áreas em vermelho (Salminen et al. 2004).

neropar 2001) contém a distribuição de elementos químicos em amostras de água superficial e de sedimentos fluviais, coletados em 697 estações, cobrindo uma área de 166.000 km². No mapa de fluoreto em água superficial (Fig. 10), extraído desse Atlas, estão representadas duas importantes anomalias positivas de flúor em água, a maior, localizada na região do Norte Pioneiro e uma segunda, localizada no Alto Vale do Ribeira. Esta última foi estudada por Andreazzini et al. (2006) que confirmaram concentrações excessivas de flúor em água de rios próximos aos depósitos e minas de fluorita que ocorrem na área, porém sem representar, aparentemente, risco potencial para a população.

A anomalia do Norte Pioneiro, revelada pelo mapeamento geoquímico da Mineropar, inspirou a realização de um levantamento epidemiológico nos municípios de São Joaquim do Pontal e Itambaracá, envolvendo 1.129 crianças, que revelou que 64% das crianças apresentavam fluorose dental, com predominância dos tipos muito leve e leve, segundo Cardoso et al. (2001).

Atualmente, o projeto de integração de dados mais importante em execução no Brasil é o Projeto de Geomedicina do Paraná, conduzido pelo Instituto Pelé Pequeno Príncipe e a MINEROPAR, com recursos da Secretaria Estadual de Ciência e Tecnologia. Segundo os executores do projeto (Ibañez, H. 2007, com. pes.) encontra-se em andamento a montagem de um sistema de *Web Mapping*, que tem por finalidade auxiliar pesquisas ambientais e de doenças crônicas de maior incidência em crianças na região. O sistema trará informações sobre a relação entre teores de elementos químicos e substâncias encontrados no meio ambiente e efeitos na saúde humana, animal e vegetal. Segundo os executores do projeto, o estado paranaense apresenta as maiores taxas de câncer no córtex das glândulas suprarrenais em crianças entre 0,8 e 3 anos. O objetivo do projeto será assim o de verificar se há e quais são as influências ambientais sobre a doença.

CONSIDERAÇÕES FINAIS As pesquisas em Geologia Médica têm como objetivo identificar as características

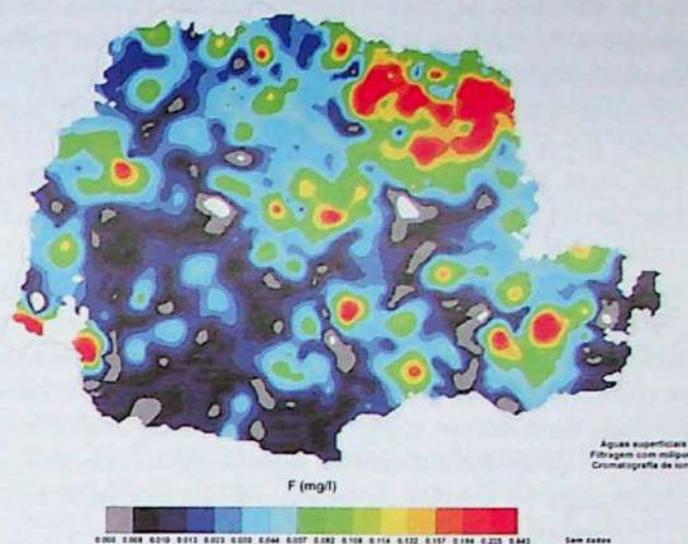


Figura 10 - Distribuição de flúor em água superficial, *Atlas Geoquímico do Paraná*. As concentrações mais elevadas de fluoreto nas áreas em vermelho (Mineropar 2001).

do meio físico e suas prováveis relações com efeitos benéficos ou adversos à saúde humana e a dos demais seres vivos. Embora neste artigo os exemplos fornecidos provênam principalmente de estudos de Geoquímica Ambiental é inegável o potencial de contribuição de todas as demais áreas das Geociências como a Geofísica, Hidrogeologia, Mineralogia, SIG, Geologia do Quaternário e outras.

Para muitos elementos e substâncias químicas, as relações entre qualidade ambiental, por um lado, e agravos ou benefícios à saúde pública, por outro, já estão bem estabelecidos. Porém, ainda há uma gama de elementos para os quais os dados toxicológicos não existem ou não estão facilmente disponíveis na literatura. O campo de pesquisa da Geologia Médica é assim muito amplo e dependente das futuras descobertas provenientes de outras áreas como a Toxicologia Experimental.

O estudo de áreas poluídas e a avaliação dos níveis de exposição humana às substâncias tóxicas nessas áreas fazem parte da Geologia Médica. Porém, o foco principal é a identificação de fatores naturais, propriedades de materiais geológicos ou anomalias geoquímicas desconhecidas que podem explicar fenômenos identificáveis entre humanos, animais e plantas. No Brasil, em especial, o conhecimento do território, da qualidade das águas e solos, dos processos recentes ou em curso na superfície da Terra, constituem tarefas inadiáveis se pensadas do ponto de vista da saúde pública.

As experiências de levantamentos geoquímicos de baixa densidade, levadas a efeito em muitos países e em alguns poucos estados brasileiros, sugerem fortemente que o mapeamento geoquímico do país precisa ser incluído entre as prioridades da cartografia nacional. Face o número grande de tarefas que a Geoquímica enseja, visto a diversidade de compartimentos e de grupos de substâncias que requerem, por sua vez, o uso de abordagens metodológicas e de técnicas analíticas diferenciadas, é improvável que uma instituição sozinha possa dar conta deste trabalho. Não obstante, a capacidade técnica e a infra-estrutura ana-

lítica, já instalada no país e distribuída em vários centros de pesquisa e Universidades, é mais do que suficiente para enfrentar esses desafios.

A partir dos exemplos de pesquisa discutidos neste trabalho é possível perceber o grande valor dos estudos de Geologia Médica. O valor desses estudos e pesquisas está sendo demonstrado em vários países por meio do desenvolvimento de novos produtos minerais, benéficos à saúde, e do lançamento de novos empreendimentos, em especial, no setor farmacêutico e de cosméticos. Por outro lado, uma grande importância pode ser percebida nas pesquisas, incluindo o mapeamento geoquímico de baixa densidade de extensas regiões, que visam a prevenção de doenças e, consequentemente, significativa economia de recursos para os setores de saúde pública, recursos hídricos, pecuária e agricultura.

A eficácia das pesquisas em Geologia Médica pode ser atingida por meio do trabalho conjunto dos cientistas da terra com especialistas de outras áreas. Trata-se de uma área de pesquisa na qual é essencial o estabelecimento de práticas interdisciplinares envolvendo uma variedade de profissionais, tais como, químicos, biólogos, geógrafos, toxicologistas, epidemiologistas, veterinários, dentistas,

engenheiros e cientistas sociais, entre outros.

Desde 2004 que vem sendo constituída a Associação Internacional de Geologia Médica (IMGA – www.medicalgeology.org), composta de Divisões Regionais, abrangendo todos os continentes. Nesse ambiente podem ser encontradas informações atualizadas, materiais de pesquisa e educacionais, por todos os interessados nessa área do conhecimento. No Brasil e demais países da América do Sul tem sido freqüente a realização de mini-cursos, conferências e simpósios dedicados ao tema da Geologia Médica. Todos os profissionais de qualquer especialidade podem tirar proveito desse conhecimento e assim enriquecer os conteúdos dos seus estudos com exemplos de aplicações em saúde pública, legitimando ainda mais as práticas das Ciências da Terra junto à sociedade.

Agradecimentos O autor agradece aos organizadores deste Volume Especial pelo convite para a apresentação deste artigo e aos meus colegas da Associação Internacional de Geologia Médica e da IUGS-GEM. Este trabalho contém resultados de pesquisas que foram apoiadas pelo CNPq (Grant no.300323/93-0) e FAPESP (Grant 2002/0271-0).

Referências

- Abrahams, P.W. 2005. Geophagy and the involuntary ingestion of soil. In: O. Selinus (ed.), *Essentials of Medical Geology*, Elsevier, Amsterdam, p: 435-458.
- Andreazzini, M.J., Figueiredo, B.R., Licht, O. A. B. 2006. Comportamento geoquímico do flúor nas águas e sedimentos fluviais da Região de Cerro Azul, Estado do Paraná. *Rev. Bras. Geoc.*, 36: 74-94.
- Appleton, J.D. 2005. Radon in air and water. In: O. Selinus (ed.), *Essentials of Medical Geology*, Elsevier, Amsterdam, p: 227-262.
- ATSDR-CERCLA 2003. *Top 20 hazardous substances from the CERCLA priority list of hazardous substances*, Comprehensive Environmental Response, Compensation, and Liability Act, CERCLA/Superfund, 2002.
- BGS 2001. *Arsenic Contamination of Groundwater in Bangladesh*. Technical Report WC/00/19, British Geological Survey, UK, 4 volumes.
- BGS 2003. *Environmental Controls in Iodine Deficiency Disorders*. Report CR/03/058N, British Geological Survey, UK, 17 p.
- Cardoso L., Morita M.C., Alves J.C., Licht O.A.B. 2001. Anomalia hidrogeoquímica e ocorrência de fluorose dentária em Itambaracá-Pr. In: SBGq, Congresso Brasileiro de Geoquímica, VIII, Curitiba. *Resumos* (CD Rom).
- Carvalho, F.M., Silvany Neto, A.M., Tavares, T.M., Costa, A.C.A., Chaves, C.R., Nascimento, L.D., Reis, M.A. 2003. Chumbo no sangue de crianças e passivo ambiental de uma fundição de chumbo no Brasil. *Revista Panamericana de Salud Pública*, 13: 1-10.
- Castilhos, Z.C., Bidone, E.D., Lacerda, L.D. 1998. Increase of the background human exposure to mercury through fish consumption due to gold mining at the Tapajós River Region, Para State, Amazon. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, Springer Verlag, New York, 61:202-209.
- CDC 2001. *Preventing lead poisoning in Young children*. Atlanta Centers for Disease Control & Prevention, U.S. Department of Health and Human Services. <http://www.atsdr.cdc.gov> acessado em 03/07/2001.
- Covello, V. & Sandaman, P.M. 2001. Risk communication: evolution and revolution. In: A. Wolbarst (ed.), *Solutions to an Environmental in Peril*. John Hopkins University Press, p: 164-178. Disponível em <<http://www.psandman.com/articles/covello.htm>>, acessado em 23/07/2008.
- CPRM 1982. *Projeto Eldorado*, Relatório Final Integrado de Pesquisa, CPRM, São Paulo, 200 pp.
- Cunha, F.G.; Figueiredo, B.R.; Paoliello, M.B.; De Capitani, E.M.; Sakuma, A. M. 2005. Human and environmental lead contamination in the Uppar Ribeira Valley, Southeastern Brazil. *Terra*, 2: 28-36.
- Davies, B.E.; Bowman, C.; Davies, T.C.; Selinus, O. 2005. Medical Geology: perspectives and prospects. In: O. Selinus (ed.), *Essentials of Medical Geology*, Elsevier, Amsterdam, p: 1-14.
- De Capitani, E.M., Sakuma, A.M., Figueiredo, B.R., Paoliello, M.M.B., Okada, I.A., Duran, M.C., Okura, R.I. 2006. Exposição humana ao arsênio no Médio Vale do Ribeira, São Paulo, Brasil. In: C. R. Da Silva et al. (eds), *Geologia Médica no Brasil*, CPRM-Serviço Geológico do Brasil, Rio de Janeiro, p: 82-87.
- Deschamps, E., Ciminelli, V.S.T., Lange, F.T., Matschullat, J., Raue, B., Schmidt, H. 2002. Soil and Sediment Geochemistry of the Iron Quadrangle, Brazil: The Case of Arsenic. *J Soils & Sediments*, 2: 216-222.
- Deschamps, E. & Matschullat, J. 2007. *Arsênio Antropogênico e Natural, Um estudo em regiões do Quadrilátero Ferrífero*, FEAM, Belo Horizonte, 330 pp.
- Di Giulio, G.M., Pereira, N.M., Figueiredo, B.F. 2008. O papel da mídia na construção social do risco: O caso Adrianópolis, Vale do Ribeira. *História, Ciências, Saúde: Manguinhos*, 15:293-311.
- Dos Anjos, J. A. S. A. 2003. Avaliação da eficiência de uma zona alagadiça (Wetland) no controle da poluição por metais pesados: O caso da Plumbum em Santo Amaro da Purificação/Ba.

- Tese de Doutorado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 326 p.
- Ebinhaus, R., Turner, R.R., Lacerda, L.D., Salomons, W., Vasiliev, O. 1999. *Mercury Contaminated Sites: Characterization, Risk Assessment and Remediation*. Berlin, Springer Verlag, 1576 pp.
- Fadini, P.S. & Jardim, W.F. 2001. Is the Negro River basin (Amazon) impacted by naturally occurring mercury? *Science of The Total Environment*, **275**: 71-82.
- FAN 2007. Fluoride Action Network, <http://www.fluoridealert.org/> Consulta em 21/07/2008.
- Figueiredo, B.R., Borba, R.P., Angélica, R.S. 2007. Arsenic occurrence in Brazil and human exposure. *Environmental Geochemistry & Health*, Springer, Netherlands, **29**: 109-118.
- Freitas, C.U., De Capitani, E.M., Gouveia, N., Simonetti, M.H., Silva, M.R.P., Kira C.S., Sakuma, A.M., Carvalho, M.F.H., Duran, M.C., Tigle, P., Abreu, M.H. 2007. Lead exposure in an urban community: Investigation of risk factors and assessment of the impact of lead abatement measures. *Environment Research*, **103**: 338-344.
- Guimarães, J.R.D., Meili, M., Hylander, L.D., Castro e Silva, E., Roulette, M., Mauroa, J.B.N., Lemos, R.A. 1997. Mercury net methylation in five tropical flood plain regions of Brazil: high in the root zone of floating macrophyte mats but low in surface sediments and flooded soils. *The Science of the Total Environment*, **261**: 99-107.
- Hacon, S.S., Rochedo, E., Calixto, R.C. 1997. Risk assessment of mercury in Alta Floresta, Amazon Basin. *Water, Air and Soil Pollution*, Holanda, **97**: 91-105.
- Horvat, M. 1996. Mercury analysis and speciation in environmental samples. In: W. Bayens, R. Ebinhauns, O. Vasiliev (eds.) *Global and Regional Mercury Cycles: Sources Fluxes and Mass Balance*, NATO ASI Series 21, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, p. 135-159.
- Jardim, W.F. & Fadini, P.S. 2001. A origem do mercúrio nas águas do rio Negro. *Ciência Hoje*, **30**: 62-64.
- Lamoglia, T., Figueiredo, B.R., Sakuma, A.M., Buzzo, M.L., Okada, I.A., Kira, C.S. 2006. Lead in food and soil from a mining area in Brazil and human exposure. *Chinese Journal of Geochemistry*, Supplementary Issue dedicated to the 7th International Symposium on Environmental Geochemistry, Beijing, September, p. 66.
- Lima de Sá, A., Herculano, A.M., Pinheiro, M.C., Silveiras, L.C.L., Do Nascimento, J.L.M., Crespo-López, M.E. 2006. Exposição humana ao mercúrio na região Oeste do Estado do Pará. *Revista Paraense de Medicina*, **20** (1), Belém.
- Lima, M.O. 2003. Caracterização geoquímica de arsênio total em águas e sedimentos em áreas de rejeitos de minérios de manganes no Município de Santana - Estado do Amapá. Dissertação de Mestrado, Belém, Curso de Pós Graduação em Geologia e Geoquímica - CPGG-UFPa, 132 p.
- Lopes Jr., I. 2005. *Atlas Geoquímico do Vale do Ribeira*, CPRM, 77 pp.
- Malm, O. 1998. Gold Mining as a source of mercury exposure in the Brazilian Amazon, *Environmental Research*, Section A **77**: 73-78.
- Matschullat J., Borba RP, Deschamps E, Figueiredo BR, Gabrio T, Schwenk M. 2000. Human and environmental contamination in the Iron Quadrangle, Brazil. *Applied Geochemistry*, **15**: 181-190.
- Mineropar 2001 *Atlas Geoquímico do Estado do Paraná*, Curitiba, 80 pp.
- Paoliello, M.M.B., Capitani, E.M., Cunha, F.G., Matsuo, T., Carvalho, M.F., Sakuma, A., Figueiredo, B.R., Reis, M.A. 2002. Chumbo no sangue de crianças e passivo ambiental de uma fundição de chumbo, *Environmental Research*, Section A **88**: 120-128.
- Paoliello, M.M.B. & De Capitani, E.M. 2005. Environment contamination and human exposure to lead in Brazil. *Reviews of Environmental Contamination & Toxicology*, **184**: 59-96.
- Perrota, M. M. 1996. Potencial aurífero de uma região no Vale do Ribeira, São Paulo, estimado por modelagem de dados geológicos, geoquímicos, geofísicos e de sensores remotos num sistema de informações geográficas. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo.
- Reimann, C., Äyräs, M., Chekushin, V., Bogatyrev, I., Boyd, R., Caritat, P. de, Dutter, R., Finne, T.E., Halleraker, J.H., Jæger, Ø., Kashulina, G., Lehto, O., Niskavaara, H., Pavlov, V., Räisänen, M.L., Strand, T. and Volden, T. 1998. *Environmental Geochemical Atlas of the Central Barents Region*. ISBN 82-7385-176-1. NGU-GTK-CKE Special Publication, Geological Survey of Norway, Trondheim, Norway, 745 pp.
- Sakuma, A.M.A. 2004. Avaliação da exposição humana ao arsênio no Alto Vale do Ribeira, Brasil, Tese de Doutorado, Faculdade de Ciências Médicas, UNICAMP, 161 p.
- Salminen, R., V. Chekushin, M. Tenhola, I. Bogatyrev, S.P. Glavatskikh, E. Fedotova, V. Gregoriuskiene, G. Kashulina, H. Niskavaara, A. Polischuk, K. Rissanen, L. Selenok, O. Tomilina, and L. Zhdanova 2004. *Geochemical Atlas of the Eastern Barents Region*. Elsevier BV, Amsterdam (Reprinted from Journal of Geochemical Exploration, vol. 83), 548 pp.
- Santos, E.C.O., Jesus, I.M., Brabo, E.S., Fayal, K.F., Lima, M.O. 2003. Exposição ao mercúrio e ao arsênio em estados da Amazônia: síntese dos estudos do Instituto Evandro Chagas/FUNASA. *Revista Brasileira de Epidemiologia*, **6**: 171185.
- Selinus, O. 2004. Medical Geology: an emerging specialty. *Terra*, **1**: 8-15.
- Selinus, O., Alloway, B., Centeno, J.A., Finkelman, R.B., Fuge, R., Lindh, U., Smedley, P. 2005. *Essentials of Medical Geology*, Elsevier, Amsterdam, 812 pp.
- Silva, A.P. 1997. *Projeto Itaituba: programa de ciência e tecnologia ambiental*. Série Tecnologia Ambiental. CETEM/CNPq. Rio de Janeiro, RJ, 66 pp.
- Smedley, P.L. & Kinniburgh, D.G. 2002. A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. *Applied Geochemistry*, **17**: 517-568.
- Smith, K.S. & Huyck, H.L.O. 1999. An overview of the abundance, relative mobility, bioavailability, and human toxicity metals. In: Geoffrey S. Plumlee & Mark J. Logsdon (eds.), *The Environmental Geochemistry of Mineral Deposits*. Reviews in Economic Geology, SEG, Michigan, 6A, p: 29-70.
- Telmer, K., Costa, M., Angélica, R.M., Araújo, E.S., Maurice, Y. 2006. The source and fate of sediment and mercury in the Tapajós River, Pará, Brazilian Amazon: Ground- and space-based evidence. *Journal of Environmental Management*, **81**: 101-113.
- Veiga, A. T. C., Salomão, E. P., Veiga, M. M., Barros, J. G. C. 1999. Tapajós Project – A Proposal for a Clean “Garimpagem” in the Brazilian Amazon. Mercury as a Global Pollutant. In: 5th International Conference, Rio de Janeiro, CETEM/UFF, Abstracts, p. 291.
- WHO 1990. *Methylmercury*. IPCS Environmental Health Criteria Document 101, World Health Organization, Geneva.

O futuro dos recursos não-renováveis: energia e sustentabilidade

Saul B.Suslick

*Depto de Geologia e Recursos Naturais – Instituto de Geociências – Universidade Estadual de Campinas -
R. João Pandiá Calógeras, 51 – Campinas(SP)Fax (19) 3289-1562 - CEP: 13083-870 –
email: suslick@ige.unicamp.br*

O Futuro dos Recursos Não-Renováveis: Energia e Sustentabilidade

Saul B. Suslick

Resumo Alguns dos principais determinantes da disponibilidade de recursos não-renováveis, com ênfase nos recursos e reservas de hidrocarbonetos são abordados neste trabalho. As diferentes visões da escassez mineral e o papel da tecnologia no suprimento futuro desses recursos indicam que o paradigma tradicional do estoque fixo vem sendo substituído pelo paradigma do custo de oportunidade, que visualiza a dotação mineral como um fluxo de recursos ao longo do tempo. Os dados neste trabalho apontam que a exaustão mineral não se trata de um fenômeno instantâneo e, caso venha a se tornar um problema crítico no futuro, os custos (exploração, produção, etc..) deverão subir de forma gradual ao longo dos anos, permitindo que a inovação tecnológica e os substitutos possam adentrar na atividade econômica antes que ocorra o esgotamento integral do recurso. Essa abordagem possui importantes implicações na análise das interações dos recursos não-renováveis no suprimento futuro de energia e na sustentabilidade.

Palavras-chave: oferta de energia, exaustão mineral, classificação de recursos e reservas petrolíferas, sustentabilidade.

Abstract *THE FUTURE OF NONRENEWABLE RESOURCES: ENERGY AND SUSTAINABILITY.* The main determinants of non-renewable resources supply with special emphasis in hydrocarbons resources and reserves are discussed in this paper. Different views of mineral scarcity and the role of technology in the future supply pointed out that traditional paradigm of fixed stock has been replacing by opportunity cost paradigm where the mineral endowment are seen as a flow of resources along time. The data presented in this paper pointed out that the scarcity is not a instantaneous phenomena. Depletion, if it becomes a critical problem, will raise the real costs of finding and producing mineral commodities, but probably slowly over years and decades. There likely will be signs such as technological innovation and substitutes to enter in the economic activity long before there actually are serious shortages or full resource scarcity. This approach has significant implications for non-renewable resources when dealing with energy supply and sustainability.

Keywords: energy supply, mineral exhaustion, oil resources and reserves classification, sustainability.

INTRODUÇÃO Os recursos não-renováveis representam uma categoria especial no que tange ao seu perfil de utilização pela sociedade. Suas jazidas são finitas, seja no sentido físico, seja no econômico, e isso implica preocupação especial acerca de sua extração, seu uso, consumo e reciclagem de tal modo a prevenir ou mitigar sua escassez ou indisponibilidade para as gerações futuras.

Sem dúvida, quando se aborda a demanda de energia, os recursos petrolíferos representam o grupo de bens minerais de maior importância na categoria dos não-renováveis, constituindo a base do desenvolvimento econômico até o presente. Estudos desenvolvidos pela IEA(2005a) indicam que os combustíveis fósseis responderão por 82% da demanda da energia primária no mundo até 2030.

Dados mais recentes coletados pela DOE/EIA (2008) apontam que, caso não ocorra a entrada de novas fontes de energia e políticas regulatórias de meio ambiente, a demanda mundial de petróleo deverá continuar crescendo a uma taxa anual de 1,6%. Como resultado, a demanda de óleo e gás deverá ter uma expansão de 70% nas próximas três décadas. Por sua vez, caso sejam mantidas as taxas de crescimento atuais e as projeções globais, novos desafios tecnológicos e de mercado deverão ser enfrentados para atender a demanda futura, bem como atenuar os impactos sobre o meio ambiente.

As dificuldades tecnológicas estão fortemente relacionadas aos custos dos processos de recuperação, bem como ao desenvolvimento e a produção dos recursos remanescentes de óleo e gás natural, além de trazê-los ao mercado consumidor. Obviamente, esses custos estão vinculados ao comportamento dos preços que dependem fortemente das interações entre a oferta e a demanda dos hidrocarbonetos.

Outro desafio importante refere-se à questão do trinômio envolvendo escassez mineral de jazidas com baixo custo, alta qualidade e grandes volumes que obrigam a incorporação da inovação tecnológica para atender a transição para uma matriz de energia com maior sustentabilidade.

À medida que inovações tecnológicas se desenvolvem a cada ano, os reservatórios de óleo e gás natural estendem o ciclo de vida¹ dos campos de petróleo ou novas jazidas se tornam viáveis, mantendo cada vez mais distante o fantasma da escassez mundial. Qual será o limite deste ciclo entre escassez e novas tecnologias? Este equilíbrio será algum dia alterado? Estaria a preocupação com a escassez sendo substituída hoje pela preocupação ambiental e a busca de modelos sustentáveis? Haveria limites para o crescimento econômico baseado na disponibilidade de recursos minerais e energéticos? Como podemos nos antecipar e evitar que essas mudanças comprometam os padrões de qualida-

¹ - Em muitos casos, a viabilidade de campos maduros, via ajuste nos preços de petróleo pode disponibilizar reservas antes consideradas de reduzido nível de economicidade.

de vida alcançados pela oferta de recursos minerais? Estariam dispostos a aceitar os impactos da internalização de todos os custos envolvidos na exploração, produção e no consumo de recursos minerais e energéticos?

Esses são alguns dos desafios que serão abordados nesse trabalho que apresenta um panorama dos principais determinantes da oferta mundial dos recursos não-renováveis, com destaque para os hidrocarbonetos e a demanda atual de energia e cenários futuros sob a perspectiva do desenvolvimento sustentado.

DEMANDA DE ÓLEO E GÁS NATURAL A Tabela 1 apresenta os dados da demanda de energia primária² no mundo. Pode-se perceber pelos dados fornecidos pela IEA (2005a) que o cenário para 2030 aponta o petróleo como a maior fonte energética. A demanda de petróleo deverá passar de 77 milhões de barris/dia em 2002 para 121 milhões de barris/dia em 2030.

O setor de transporte continuará respondendo por 54% do uso de petróleo em 2030, quando comparado com 47% atualmente e 33% em 1971. O petróleo sofre, ainda, uma baixa competição dos demais combustíveis no segmento de transporte (rodoviário, marítimo e aéreo) na maioria dos países³.

Em relação ao petróleo, observa-se que o maior crescimento da demanda se deu nos países não pertencentes à OCDE (Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico), principalmente China, Índia e demais países emergentes (Figura 1). Pode-se observar que, no período entre 2000 a 2007, esse grupo de países vem apresentando crescimento médio da demanda de petróleo e gás natural acima dos países industrializados, gerando diversos impactos no mercado, principalmente na elevação dos preços, fruto do desequilíbrio e das dificuldades da oferta para atender no curto prazo o aumento súbito da demanda.

Devido ao seu menor impacto ambiental, a demanda por gás natural em 2030 deverá apresentar um crescimento maior acima de 2,0%, principalmente como fonte de geração elétrica. O consumo de gás natural deverá crescer nos países em desenvolvimento, pois a sua demanda de

energia elétrica será mais pronunciada.

RECURSOS E RESERVAS Quando se aborda a oferta de óleo e gás natural, os primeiros aspectos a serem discutidos referem-se à distinção entre recursos e reservas, os quais não se limitam aos aspectos geológicos, mas abrangem implicações políticas e econômicas.

Tendo em vista que um número significativo de empresas que operam com recursos não-renováveis (mineração e petróleo) é de empresas abertas, mantendo ativos comercializados em bolsas de valores ao redor do mundo, foi detectada a necessidade de se obter relatórios confiáveis para os diferentes participantes (investidores, agências de financiamento, governos, entre outras partes interessadas). Neste sentido, autoridades do governo e reguladores decidiram que tais relatórios deveriam ser apresentados sob princípios de transparência, materialidade e competência. Esta política protegeria os investidores de informação deturpada ou incompleta sobre os ativos das empresas. Isso explica o motivo pelo qual os comitês de valores mobiliários das bolsas regulam o relato de informações das atividades de pesquisa mineral, descobertas minerais, recursos e reservas. As decisões sobre quando e quais informações deverão ser divulgadas publicamente são de única responsabilidade da entidade proprietária da informação, e estão sujeitas às regras e aos regulamentos das bolsas de valores. Esses procedimentos variam ao longo do tempo e, em decorrência dessa evolução, podem aparecer discrepâncias com os padrões e guias de reservas (US-SEC, 1978).

No caso do petróleo percebeu-se que o sistema pode apresentar vulnerabilidades e elevados níveis de incertezas em decorrência das especificidades e das características das jazidas minerais. Além disso, uma parte significativa dos recursos e reservas, principalmente pertencentes à OPEP são ativos de empresas estatais controlados pelos respectivos países produtores, as quais não seguem as regras das entidades reguladoras e, tampouco, fornecem relatórios sistemáticos e informações sobre recursos e reservas.

Os planejamentos públicos de longo prazo e do seg-

Tabela 1 – Demanda Mundial de Energia Primária (valores expressos em Mtoe) (dados IEA, 2005a e DOE/EIA, 2008)

	1971	2002	2010	2020	2030	2002-2030*
Carvão	1407	2389	2763	3193	3601	1,5%
Petróleo	2413	3676	4308	5074	5766	1,6%
Gás	892	2190	2703	3451	4130	2,3%
Nuclear	29	692	778	776	764	0,4%
Hídrica	104	224	276	321	365	1,8%
Biomassa	687	1119	1264	1428	1605	1,3%
Outros renováveis	4	55	102	162	256	5,7%
Total	5536	10345	12194	14404	16487	1,70%

(*) taxa média de crescimento anual no período Mtoe = Milhões de toneladas de óleo equivalente

2 - Energia primária refere-se à produtos energéticos providos pela natureza na sua forma direta, como petróleo, gás natural, carvão mineral, etc.

3 - O Brasil é um caso interessante no segmento de transporte, decorrência dos altos níveis de produtividade e eficiência do setor agrícola e do aumento dos preços de petróleo, possibilitaram o crescimento de veículos com tecnologia flex-fuel que atingem atualmente aproximadamente 68% dos 2,9 milhões de veículos produzidos no país em 2007 (ANFAVEA, 2008)

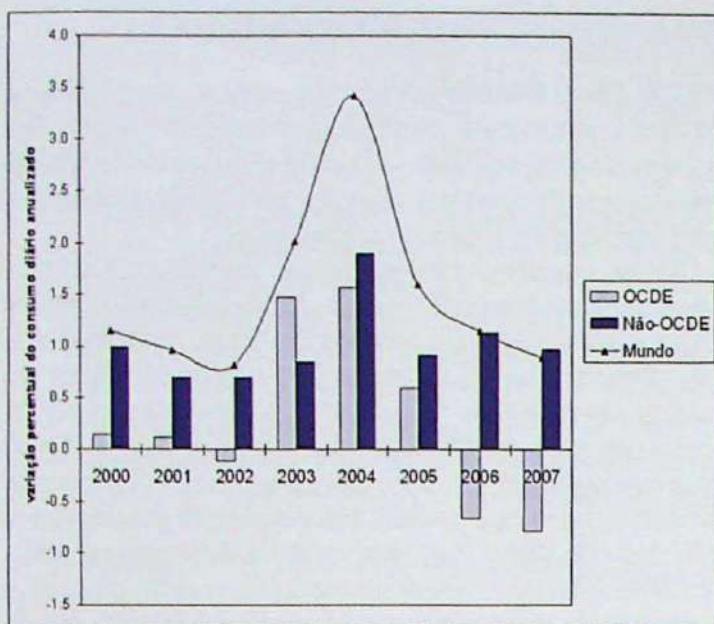


Figura 1 – Variação percentual do consumo de petróleo entre 2000 a 2007 (dados IEA, 2007 e DOE/EIA, 2008)

mento privado devem estar baseados na probabilidade de descoberta de novas jazidas, em desenvolver processos de extração econômicos para jazidas atualmente não-comerciais, e em saber quais os recursos que estarão imediatamente disponíveis. Isso significa que recursos devem ser continuamente reavaliados à luz de novos conhecimentos geológicos, do progresso da ciência e tecnologia e de mudanças nas condições econômicas e políticas. O Serviço Geológico dos EUA (USGS), por exemplo, coleta informações sobre a quantidade e qualidade de todos os recursos em hidrocarbonetos, no seu próprio território e no exterior (USGS, 2000, Ahlbrandt et al., 2005). Atualmente, reavaliações obrigatoriamente incluem a internalização dos crescentes custos ambientais que, outrora eram tratados como externalidades, que provocam impactos nos estudos de viabilidade econômica e, consequentemente, no quadro de recursos e reservas (Suslick et al 2005).

Apesar dos avanços recentes no tocante à padronização de definições e conceitos, algumas diferenças persistem entre o significado absoluto de “recursos” e “reservas” publicadas por sociedades técnicas e órgãos reguladores. Algumas das principais razões devem-se ao caráter complexo e heterogêneo dos diversos tipos de reservatórios, aos procedimentos de estimativa utilizados, que nem sempre retratam com o devido grau de confiança as heterogeneidades, bem como as dificuldades naturais de padronização e aferição das informações sobre os recursos e reservas.

Uma tentativa realizada por diversas entidades⁴ para classificação de recursos e reservas de petróleo⁵ pode ser encontrada em SPE(2007). O termo “recurso” utilizado pela SPE (2007) busca enquadrar toda quantidade de

petróleo encontrado naturalmente na crosta, descoberto e não descoberto, recuperável e não recuperável somado com as quantidades já produzidas, incluindo os recursos de óleo e gás natural convencional e não-convencional. A Figura 2 apresenta a classificação da SPE (2007) entre recursos e reservas associada ao nível de incerteza, o grau de informação e o estágio de maturação do projeto.

Segundo a SPE (1997), as reservas são quantidades de petróleo a serem recuperadas comercialmente pela aplicação de projetos de desenvolvimento em acumulações conhecidas sob condições definidas de uma determinada data adiante. Por sua vez, as reservas devem satisfazer quatro critérios: estarem associadas a uma descoberta, serem recuperáveis, apresentarem viabilidade comercial e a recuperação dos volumes remanescentes deve ser baseada nos projetos de desenvolvimento aplicados no período da sua avaliação. As reservas são classificadas de acordo com o nível de incerteza associado às estimativas e ao grau de maturidade dos projetos e/ou caracterizadas pelo desenvolvimento e status da produção.

Recurso contingente são as quantidades estimadas de petróleo, em uma determinada data, potencialmente recuperável de acumulações conhecidas, mas os projetos ainda não são considerados maduros o suficiente para desenvolvimento comercial devido a uma ou mais contingências. Pode incluir, por exemplo, projetos nos quais atualmente inexistem mercados viáveis, ou a recuperação depende de tecnologia ou, ainda, a avaliação da acumulação é insuficiente para declarar comercialidade. Recurso contingente pode ser classificado de acordo com o nível de incerteza associado às estimativas, bem como associando ao grau de maturidade do projeto e/ou caracterizado pelo seu status econômico.

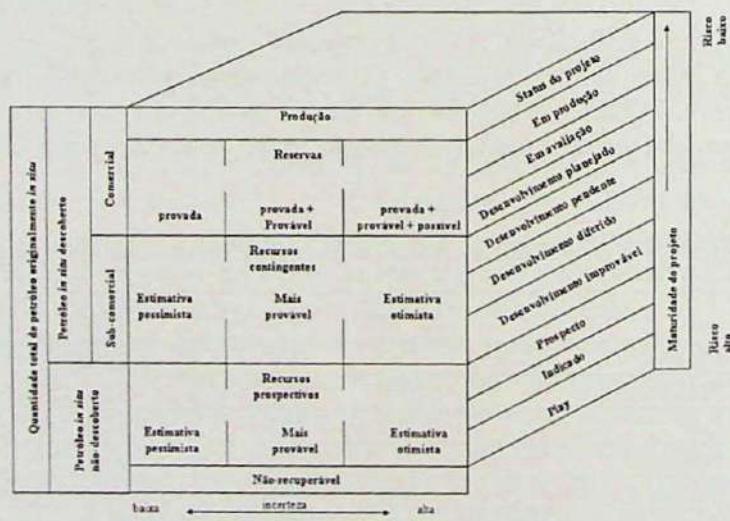


Figura 2 – Classificação de recursos e reservas de petróleo: Intereração entre risco, incerteza e estágio de maturação do projeto (modificado de SPE, 2007)

4 - Society of Petroleum Engineers (SPE), World Petroleum Council (WPC), American Association of Petroleum Geologists (AAPG) e Society of Petroleum Evaluation Engineers (SPEE).

5 - De acordo com o Petroleum Resources Management System (PRMS), que é o documento que expõe as definições e critérios de classificação da SPE (2007), petróleo é definido como mistura natural de hidrocarbonetos nas fases sólida, líquida e gasosa. Petróleo pode conter em sua composição elementos que não são hidrocarbonetos, tais como dióxido de carbono, enxofre, nitrogênio e em casos raros estes elementos podem ultrapassar 50% da composição.

Recursos prospectivos são quantidades de petróleo estimadas em uma data definida que podem ser potencialmente recuperáveis das acumulações não descobertas utilizando-se projetos de desenvolvimento. Nessa categoria de recurso estão associados à probabilidade de descoberta e de desenvolvimento, bem como aos níveis de incerteza vinculados às estimativas futuras de recuperação e ao grau de maturidade do projeto.

As categorias de recurso incerto podem ser usadas para definir a faixa de melhor estimativa de qualquer recurso e provêem uma base para a monitoração das estimativas, as quais servem para indicar as incertezas na metodologia de avaliação. A categoria de status de recurso pode ser usada para definir o estágio de maturação dos projetos (produção, desenvolvimento, avaliação, etc..) e para prover uma base de gestão de portfólio de projetos. Algumas metodologias para a classificação de reservas e suas implicações nas estimativas de recursos e reservas podem ser encontradas nos trabalhos de Ross (2001), NPD (2001) e Demirmen (2007). No caso da classificação das reservas e recursos petrolíferos no Brasil, a ANP (2000) adota o modelo internacional de classificação da SPE (2007). Os esquemas de classificação de recursos e reservas revelam aspectos importantes de riscos e do grau de conhecimento das informações que são revelados pelos estágios de maturidade dos projetos. Essas variáveis adicionam níveis crescentes de incertezas na definição das categorias de recursos e reservas do patrimônio mineral com impactos significativos no processo decisório dos investimentos.

Recursos Convencionais Os dados sobre os recursos mundiais de hidrocarbonetos apresentados na Figura 3 exibem um pouco da complexidade e das dificuldades na avaliação da disponibilidade dos recursos petrolíferos.

Em relação aos recursos convencionais de óleo pode-se inferir pelos dados fornecidos pelo USGS (2000) e IEA (2005b) que os volumes situam-se na faixa de 8,0 trilhões de barris de óleo convencional, dos quais 1 trilhão de barris já foi consumido e 3,3 trilhões podem ainda ser considerados como recuperáveis com as tecnologias atualmente disponíveis. Deste modo, pode-se inferir que apenas 25% dos volumes recuperáveis de óleo convencional atuais foram produzidos e consumidos pelo mundo, considerando-se o patamar atual de recuperação possível. Essas estimativas apresentam algumas discrepâncias conforme será apontado mais adiante. A Figura 4 mostra um detalhamento da distribuição dos recursos de óleo abrangendo os volumes consumidos até o presente, oriundos da produção acumulada em 2006, OPEP, óleo convencional, as diversas regiões e tipos de óleo, bem como o potencial da exploração a ser descoberto⁶.

Os recursos de gás convencional tecnicamente recuperável atingem um volume aproximado de 480 trilhões de m³ ou 3,0 trilhões de barris de óleo equivalente (boe), dos quais somente 0,5 trilhões de boe foram produzidos (Figura 3). Estima-se que os impactos tecnológicos nos

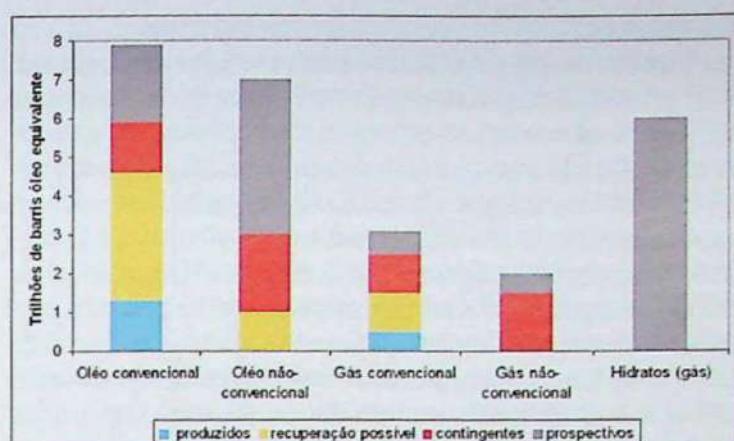


Figura 3 – Recursos mundiais em hidrocarbonetos (dados do USGS, 2000 e IEA, 2005b).

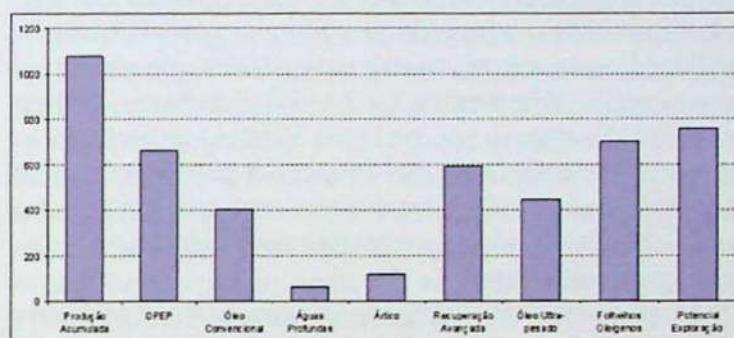


Figura 4 – Produção acumulada de óleo e recursos globais (valores expressos em bilhões de bbl (dados extraídos do CERA, 2007, National Energy Board of Canadá, 2007, USGS, 2007, Jackson, 2007)).

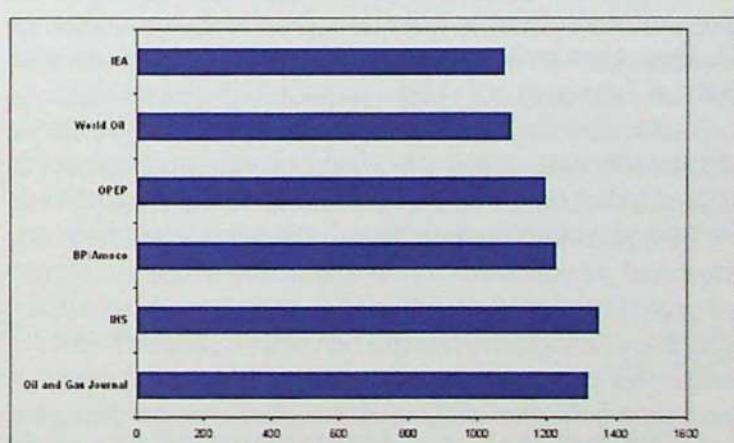


Figura 5 – Reservas mundiais de óleo e gás natural segundo as várias fontes (dados relativos a 2006 expressos em bilhões de barris).

fatores de recuperação dos reservatórios convencionais de gás natural apresentem bom desempenho, favorecendo as

6 - Observa-se uma discrepância em relação às estimativas do IEA(2005), pois os dados da Figura 4 consideraram um volume adicional de 400 bilhões de barris a ser obtido pelo potencial de exploração

projeções para maior parte desses reservatórios.

As estimativas de reservas provadas⁷ de óleo e gás natural oriundas de diferentes fontes são exibidas na Figura 5. Pode-se observar uma elevada discrepância nas estimativas, fruto das incertezas e das dificuldades de padronização entre recursos e reservas. Essas estimativas devem ser analisadas dentro da perspectiva dos volumes já produzidos e as taxas de produção anuais. Além disso, são incluídos alguns indicadores da razão entre reservas provadas em relação à produção anual, que fornecem uma visão estática do número de anos de produção remanescentes e que atingem uma média de 40 anos para o óleo e 60 anos para o gás natural sustentadas pelas reservas provadas atuais.

Recursos Não-Convencionais⁸ Os recursos de óleo não-convencional envolvem óleos pesados, betume, areias oleígenas e rochas oleígenas (folhelhos betuminosos e pirobetuminosos), atingindo um volume global 7 trilhões de barris. As estimativas das quantidades que podem ser recuperadas variam entre 1 a 3 trilhões de barris. Um volume relativamente baixo de 10 bilhões de barris já foi consumido nessa categoria de recurso não-convencional. Algumas das características dessa categoria de recursos serão abordadas no item referente ao papel da tecnologia no suprimento futuro.

Os principais tipos de gás não-convencional⁹ incluem o gás metano das camadas de carvão (CBM – coal bed methane), gás confinado, ou seja, gás proveniente de reservatórios com baixa permeabilidade que demandam tecnologias de produção especiais. Conforme mostra a Figura 3, estima-se um potencial de 250 trilhões de metros cúbicos (1,8 trilhões de barris de óleo equivalente) de gás não-convencional envolvendo gás metano das camadas de carvão, gás confinado, gás de folhelhos, bem como reservatórios de água geotérmicos (geopressurizados), embora as estimativas internacionais não sejam ainda muito precisas.

Outro tipo de gás não-convencional são os hidratos de gás, ou clatrato, que é um sólido cristalino composto de água e gases de peso molecular pequeno. Os hidratos de metano são abundantes em sedimentos submarinhos nas

margens continentais (Clennel, 2000). As informações sobre esses recursos são muito imprecisas variando entre 1.000 a 10.000.000 trilhões de metros cúbicos de gás provenientes dos hidratos nos sedimentos marinhos, enquanto nos ambientes de *permafrost* esses volumes podem variar entre 6 a 60.000 trilhões de barris de óleo equivalente. Apesar das estimativas apresentarem grande variabilidade, os volumes de gás dos hidratos tendem a ser superiores aos existentes nos reservatórios de gás convencional, considerando-se que não há conhecimento dos níveis de recuperação e de sua viabilidade econômica.

AS VISÕES DA ESCASSEZ E A DISPONIBILIDADE DE RECURSOS NÃO-RENOVÁVEIS As preocupações sobre a disponibilidade de recursos naturais necessários para manter o padrão de vida datam do século 18, quando Thomas Malthus observou que a terra e os recursos se expandiam a uma razão aritmética, enquanto a população crescia a uma razão geométrica. Todavia, esta preocupação tem sido esporádica, tendendo a crescer quando os mercados para recursos minerais encontram-se mais demandantes e os preços elevados, e a decrescer quando esses mercados se situam como ofertantes e os preços baixos.

Duas escolas de pensamento têm explorado vários aspectos da disponibilidade de recursos ao longo das últimas décadas. Primeiro, a *escola empírica*, que tem como foco as tendências de medição da disponibilidade de recursos ao longo do tempo. Esta aproximação requer uma medida apropriada de escassez, por exemplo, medidas físicas, tais como partes por milhão de um metal na crosta terrestre ou a quantidade de petróleo originalmente in situ. Além das medidas físicas, há medidas econômicas, das quais três são comumente usadas: preço real, custo de produção para o produtor marginal e o valor do mineral no subsolo antes do desenvolvimento da jazida na qual ele se encontra. Os economistas às vezes se referem a isso como a renda pura associada ao depósito mineral, o que sob certas condições pode ser semelhante ao custo da descoberta. Ambas as medidas física e econômica são aceitas, mas podem ser enganosas se não forem usadas adequadamente.

Tabela 2 – Indicadores de custos de capital e trabalho por unidade de produção para a indústria extractiva nos EUA, 1870-1957 (1929=100)

Período ou ano	Indústria extractiva(*)	Agricultura	Indústria Mineral	Indústria Florestal
1870-1900	134	132	210	59
1919	122	114	164	106
1957	60	61	47	90

Fonte: BARNETT e MORSE (1963) (*) indústria extractiva inclui os seguintes setores: mineral, petróleo, agricultura e indústria florestal

7 - As entidades assumem reservas provadas como definidas com base na análise de dados geológicos e de engenharia, nos quais se estima recuperar comercialmente reservatórios descobertos e avaliados, com elevado grau de certeza, e cuja estimativa considere as condições econômicas vigentes, os métodos operacionais usualmente viáveis e o arcabouço regulatório.

8 - As distinções entre convencional e não convencional não são muito claras na literatura. Na indústria existe uma tendência de classificar como não-convencional qualquer fonte de hidrocarboneto que requer tecnologias complexas distintas das utilizadas tradicionalmente para explotar um reservatório convencional. Entretanto, essa classificação é imprecisa e não incorpora a componente temporal da evolução tecnológica. Por exemplo, os recursos não-convencionais em óleos pesados que no passado foram classificados como não-convencionais atualmente já são produzidos em escala comercial.

9 - Não existe uma definição única de gás não-convencional. Esse termo geralmente é utilizado como referência para os tipos de reservatórios peculiares, nos quais o gás para ser produzido demanda complexas tecnologias e usos sistemáticos de técnicas especiais de estimulação.

O mais conhecido estudo dentro da escola empírica foi realizado por Barnett & Morse (1963). Estes autores avaliam as tendências de 1870 até 1957 para diferentes *commodities*, sugerindo que os recursos em geral estão se tornando menos escassos (em contraposição a mais escassos), apesar de sua extensiva extração ao longo do tempo. A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos pelos autores, na qual os custos de produção são medidos em termos de custos de capital e trabalho por unidade de produção.

Pode-se observar que as quantidades de trabalho e capital para produzir os recursos declinaram mais de 50% no período aproximado de 90 anos, apesar do grande crescimento do consumo mineral nesse período. O principal fator parece ter sido a introdução de novas tecnologias, cujos efeitos de redução de custos no penúltimo século, aparentemente, mais que compensou os efeitos de aumento dos custos resultantes da exaustão dos recursos. Por essas razões, esta abordagem enfatiza o custo de oportunidade de encontrar e processar recursos exauríveis, rejeitando o paradigma do estoque fixo. Como se pode observar na Figura 6, as estimativas de reservas provadas de óleo para os últimos anos mostram valores constantes no período, inclusive crescentes para o grupo da OPEP, mas, como mencionado anteriormente, os volumes de reservas desses países não passam por uma sistemática de verificação e controle.

A segunda abordagem, chamada de *escola teórica*, determina o uso ótimo de um recurso de estoque fixo ao longo do tempo e é representada pela contribuição de Hotelling (1931), e um volumoso conjunto de trabalhos produzido por diferentes pesquisadores que adaptaram as condições atuais. A principal contribuição de Hotelling foi demonstrar que uma empresa extraíndo um estoque fixo de recurso se comportaria diferentemente de outras empresas operando em outros setores econômicos (p.ex. na produção de sapatos ou no setor agrícola). Uma empresa explorando um recurso não-renovável precisa reconhecer que a produção corrente incorre em dois tipos de custos. O primeiro cobre custos de produção e é semelhante em natureza ao custo marginal considerado por todas as empresas. O segundo é o custo de oportunidade associado com a exaustão do estoque fixo de recurso, assim reduzindo a quantidade disponível para uso futuro. Este custo

de uso, como é comumente chamado, é o valor presente da redução nos lucros futuros auferidos por produzir mais uma unidade de produção durante esse período.

Outro aspecto importante levantado por Hotelling, com uma implicação importante na teoria de escassez de recursos, é que ao longo do tempo o valor de um recurso deixado no subsolo crescerá à taxa de desconto da empresa, o que reflete a taxa de juros que a empresa poderá ganhar em outras oportunidades de investimento. Além do custo de produção de uma unidade adicional, temos o custo de oportunidade representado na Figura 7 pelo custo de uso, que equivale ao valor presente da perda dos lucros futuros. Desta maneira, a empresa tem o incentivo para expandir a sua produção durante qualquer período até o limite no qual o custo marginal para produzir uma unidade adicional mais o custo de uso é igual ao preço de mercado do bem mineral. A Figura 7 ilustra esta diferença, na qual uma empresa com um estoque fixo de recursos produz as quantidades Q_1 e a empresa sem custos fixos elevados pode expandir a sua produção até atingir as quantidades Q_2 . Expressa de outra forma, essa visão de Hotelling parece intuitiva, porque se o valor do recurso não estiver crescendo a essa taxa, a empresa não tem um incentivo para lavrar quantidades adicionais do recurso mineral (petróleo, gás natural, metais etc.) tão rapidamente quanto possível e, caso contrário, aplicaria os seus lucros em outros investimentos de maior rentabilidade.

Esse modelo indica que a escassez de recursos crescerá ao longo do tempo, porque o valor do recurso no subsolo é uma das medidas econômicas da escassez. Isso é muito controverso, já que a inovação tecnológica e as atividades de exploração mostram um aumento da disponibilidade mineral. O modelo de Hotelling (1931) pressupõe a jazida mineral como uma simples porção econômica homogênea apresenta diversas limitações. Para contornar essas restrições existem atualmente modelos que assumem o estoque de recurso como heterogêneo, mais próximo da visão da indústria. Por exemplo, uma empresa explota inicialmente as jazidas com reservatórios que apresentam melhores fatores de recuperação. Na seqüência as porções das jazidas com custo crescentemente mais alto até que atinge os reservatórios com menores fatores de recuperação, nos quais o preço de mercado não mais cobre os custos de produção. Em tais modelos, a exaustão econômica pode ocorrer sem exaustão física, e as firmas podem cessar suas operações antes que todos os volumes de petróleo (ou de menor qualidade) tenham sido realmente produzidos.

O que existe realmente são fluxos de recursos (em desenvolvimento e alguns não-descobertos) para um inventário de reservas. Caso sejam desconsiderados alguns pressupostos rígidos da teoria de Hotelling (taxa de juros, jazidas homogêneas e a não incorporação da tecnologia), pode se esperar que o valor dos recursos minerais no subsolo não precisa crescer na mesma proporção que a taxa de juros ao longo do tempo. De um modo geral, com o avanço da exploração e das novas tecnologias, o valor do recurso no subsolo pode até decair, demonstrando que a disponibilidade do recurso mineral está inclusive crescendo ao longo do tempo. Dados recentes assumindo diferentes cenários de crescimento da produção mineral primá-

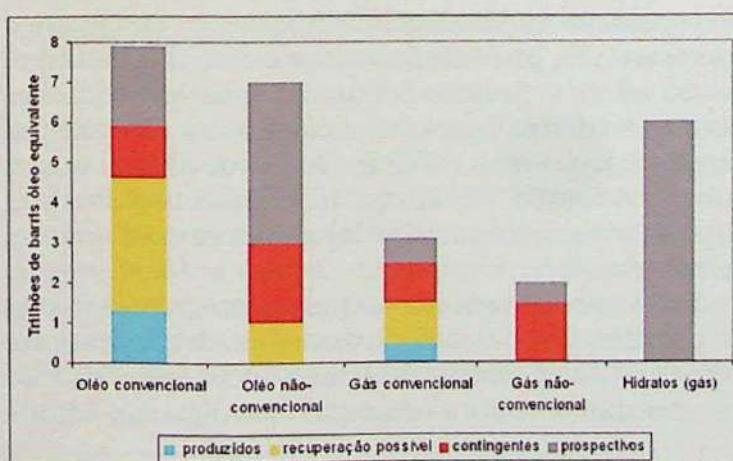


Figura 6— Evolução das reservas provadas: 1980-2005 (IEA, 2005b e DOE/EIA, 2008)

ria concluíram que diversos bens minerais possuem uma elevada disponibilidade para o século XXI (Tilton, 2002; Suslick et al., 2005).

Os atuais modelos que propõem uma relação entre recursos naturais e desenvolvimento sustentável dividem o estoque total de capital da sociedade em capital produzido pelo homem e o capital natural (Mäler et al., 1994). Os recursos não-renováveis são uma parte do estoque de capital natural, e sua extração causa o declínio do capital natural ao longo do tempo. Esses modelos demonstram que o desenvolvimento sustentável é possível mesmo considerando os recursos não-renováveis como *inputs* para os processos de produção (Auty & Mikesell, 1999; Hilson & Murck, 2000). Todavia, estima-se ser possível substituir o capital natural pelo capital criado diretamente ou por sucessivas formas de atividades antrópicas (o processo de produção), embora a quantidade de capital criado pelo homem requerida por unidade de capital natural possa crescer à medida que o estoque de capital natural diminui. Se isso pode continuar indefinidamente, todavia, não se tem certeza. A extensão até onde isso é factível, depende da elasticidade da substituição do capital natural pelo capital criado pelo homem.

A abordagem do estoque fixo leva a uma expectativa mais pessimista, limitando a substituição do capital natural pelo capital criado pelo homem. O desenvolvimento sustentável baseado na extração continuada de recursos não-renováveis é, desse modo, um desafio difícil e pode, de fato, se tornar complexo e de difícil execução. Por sua vez, o custo de oportunidade (visão do estoque como fluxo) apresenta uma expectativa mais otimista. A mudança tecnológica, a substituição, a reciclagem, as novas descobertas e outros fatores induzidos pelo sistema de preços são componentes reais e atuais do mundo moderno e ajudarão a manter o desenvolvimento sustentável mesmo com o crescimento da extração dos recursos minerais.

Os dados empíricos mostram que o conceito de estoque finito de recursos não-renováveis deve ser visto dentro de uma perspectiva mais ampla. Deve-se considerar que os recursos minerais constituem um fluxo. À medida que os recursos estão sendo convertidos em reservas e esses últimos estão sendo continuamente extraídos, novos programas de exploração levam à descoberta de depósitos não previamente conhecidos. Esta seqüência ou fluxo continua indefinidamente para todos os efeitos práticos. Novas descobertas acontecem em duas dimensões: verticalmente, significando que a profundidade de uma jazida é crescente; ou horizontalmente, implicando que novas áreas ou regiões são reveladas em áreas inexploradas. O limite absoluto no futuro seria ditado por, primeiro, uma profundidade na crosta terrestre onde nenhuma tecnologia poderia lidar com aquele tipo de ambiente; ou segundo, a ausência de novas áreas inexploradas ou virgens, seja no continente, seja em áreas marítimas, para efeito de exploração, excluindo-se as áreas indisponíveis devido a razões variadas (restrições ambientais, reservas de povos indíge-

nas, instalações militares, ocupação urbana, outros usos econômicos, e assim por diante).

A abordagem do Clube de Roma O Clube de Roma no seu primeiro relatório indicou sinais alarmistas de que o mundo estava sofrendo um esgotamento daqueles recursos necessários para manter os estilos de vida correntes (Meadows et al., 1972). Esse relatório sofreu severas críticas de muitos pesquisadores, pois seus cenários extremamente pessimistas não se materializaram. As principais críticas mostraram que o estudo falhou em não levar em conta o mecanismo de preço, bem como não incluíram a capacidade de inovação científica e tecnológica para resolver os problemas mundiais.

O relatório do Clube de Roma era baseado em um modelo de simulação, uma representação matemática das principais variáveis e suas interações dinâmicas, conhecido por "World III Model" (Forrester, 1971). Modelos dinâmicos permitem a calibragem de variáveis para visualização dos impactos criados no sistema como um todo, mas dependem da boa qualidade dos dados e da capacidade de processamento. Para o início da década de 1970, este projeto era demasiadamente ambicioso. Os computadores eram muito limitados e os métodos de coleta de dados eram ainda rudimentares na época na qual foram realizadas essas estimativas.

Com relação precisamente à questão da exaustão dos recursos não-renováveis, o Relatório do Clube de Roma foi importante ao iniciar um debate sobre a disponibilidade futura daqueles recursos, um debate que ainda é muito ativo e desafiante. A discussão sobre a disponibilidade dos recursos minerais continua em parte por causa de avaliações distintas sobre a capacidade da inovação tecnológica para continuar indefinidamente a neutralizar os efeitos de custo crescente da exaustão. Além disso, o foco do debate sobre a disponibilidade de recursos tem mudado de direção. Empresas produtoras, graças a novas tecnologias, podem estar se ajustando aos custos de exploração e produção, mas os custos ambientais e outros custos sociais associados com a produção e uso de recursos não-renováveis irão impedir, não obstante, o seu uso mais extensivo.

O PAPEL DA TECNOLOGIA NO SUPRIMENTO FUTURO As visões sobre a escassez indicam um papel preponderante da tecnologia na modelagem dos recursos não-renováveis para atender o suprimento futuro. Os recursos em óleos pesados constituem uma referência importante sobre os impactos tecnológicos na sua transformação em reservas econômicas. Os padrões internacionais sobre as definições de óleo pesado variam bastante, pois dependem das oportunidades econômicas e das inovações tecnológicas¹⁰.

Esses tipos de petróleo possuem uma grande proporção de hidrocarbonetos de alta massa molar, tipicamente com mais de 15 átomos de carbono por molécula. Essa característica dificulta a separação óleo-água nos separa-

10 - A API (American Petroleum Institute) classifica óleo pesado os óleos que possuem densidade API inferior a 20. Segundo a ANP petróleos com densidade API inferior a 22 e superior a 10 são classificados como "óleos pesados", cuja densidade é próxima à da água – acima de aproximadamente 920 kg/m³. Os petróleos que possuem

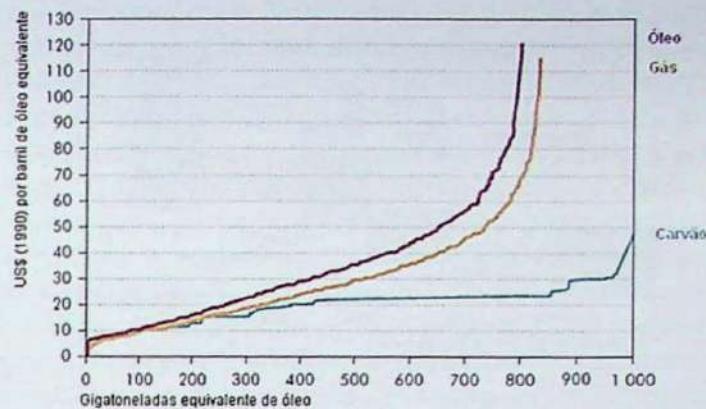
dores de superfície e faz com que o refino desses óleos, com as tecnologias atuais, resulte em menores quantidades de GLP, gasolina, querosene e diesel, o que reduz o seu valor comercial. Segundo Trevisan et al. (2007), os óleos pesados apresentam-se com elevada viscosidade – de 100 a 10.000 vezes a viscosidade da água, na superfície – o que torna difícil e cara e, muitas vezes, inviabiliza sua movimentação desde o reservatório até a superfície, etapa denominada produção.

A experiência mundial mostra que a produção de óleos pesados tem sido bem-sucedida em campos terrestres e em alguns campos marítimos sob águas rasas (abaixo de 400 m). As tecnologias de recuperação e produção de óleos pesados sob águas profundas estão em desenvolvimento. A Petrobras tem realizado progressos significativos por intermédio dos seus programas tecnológicos (Propes, 2007) envolvendo o aumento da recuperação nos reservatórios, incremento da produtividade de poços, utilização de tecnologias de elevação artificial que facilitam o escoamento do óleo desde o poço até a superfície com um mínimo de adição de energia.

Os limites para adicionar reservas a partir dos recursos convencionais e não-convencionais representam um elemento estratégico e sensível para as empresas e os governos. Partindo do pressuposto que a matriz energética até 2030 contará ainda com uma presença significativa de hidrocarbonetos na sua composição, a Agência Internacional de Energia desenvolveu diversos modelos¹¹ para estimar quais seriam os impactos no futuro desse desenvolvimento tecnológico. Esse modelo inclui tecnologias abrangendo suprimento de energia, geração de eletricidade para diversos usos finais de energia em regiões do mundo, visando identificar o mix de tecnologias e combustíveis que minimizariam o custo do sistema energético para um cenário específico (Gielen e Unander, 2004).

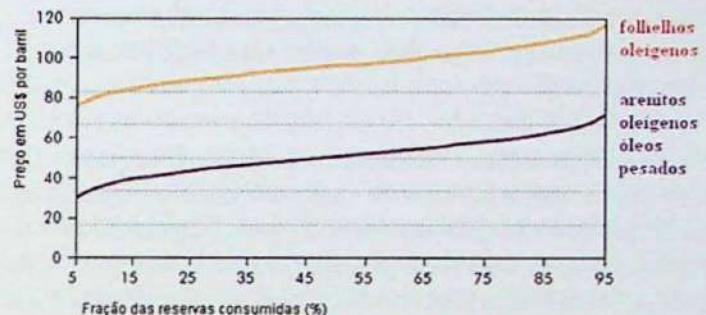
Nas diversas opções do modelo são incluídos os custos das emissões de CO₂, emissões produzidas pela cadeia de geração das fontes de energia ou assumindo-se que as emissões são capturadas e armazenadas em diferentes ambientes (estruturas geológicas, ambientes marinhos, entre outros). Os resultados preliminares produzidos por Gielen e Unander (2005) indicam que o óleo e gás natural devem predominar no mercado de combustíveis até 2050, mas a sua participação tenderá a diminuir a partir de 2030 devido à entrada de combustíveis oriundos de fontes alternativas (biocombustíveis, entre outras fontes).

Na previsão dos custos e do desempenho das futuras tecnologias com potencial para transformar os recursos e reservas utiliza-se a abordagem das curvas de aprendizado (Pereira & Suslick, 2003). Attanasi(1998) apresentou estimativas baseadas em funções de custos incrementais nos quais a indústria é capaz de adicionar reservas provadas assumindo dependências em função das curvas de custos marginais. Essas curvas são obtidas da distribuição de probabilidade dos recursos de sistemas petrolíferos no mundo,



(a) Custos de óleo, gás natural e carvão (Rogner, 1997)

Nota: 1 tonelada de óleo equivalente é aproximadamente 7 barris de óleo equivalente



(b) Custos de óleo para recursos não-convencionais (Greene et al., 2003)

Figura 8 - Estimativas de custos futuros para diferentes tipos de recursos de hidrocarbonetos

incorporando as variáveis vinculadas aos custos de descoberta, desenvolvimento e produção desses recursos.

A Figura 8 representa uma estimativa da curva de custos para óleo, gás natural e carvão realizada por Rogner(1997) para recursos convencionais. Esta estimativa utilizou a opinião de especialistas, assumindo uma redução de custos de 1% obtida pelo sistema de aprendizado¹². Greene et al. (2003) utilizaram metodologia similar para estimar os custos para os recursos não-convencionais, abrangendo folhelhos, arenitos oleígenos e óleos pesados (Figura 8b).

Baseando-se nesse tipo de projeções de custos produzidos por esses modelos é possível estimar o impacto do progresso tecnológico na disponibilidade de recursos petrolíferos como função de um preço de referência conforme mostra a Figura 9 adaptada do IEA (2005b). O eixo das ordenadas na Figura 9 representa o preço de óleo (preço de equilíbrio em 2004) no qual os diferentes tipos e volumes de recursos (convencionais ou não-convencionais) tornam-se uma opção econômica, incluindo os custos de captura e armazenamento de CO₂ produzidos durante a extração de petróleos não-convencionais. O eixo das

11 - Um dos principais modelos utilizados é o ETP -Energy Technology Perspectives (Gielen e Unander, 2004).

12 - Esse modelo pressupõe que o processo de produção ocorre sempre a partir das jazidas com menor custo, o qual nem sempre ocorre no contexto do perfil de produção mundial de petróleo, pois a OPEP exerce um monopólio parcial no mercado, provocando distorções na escala de custos em decorrência dos seus objetivos e ações no mercado.

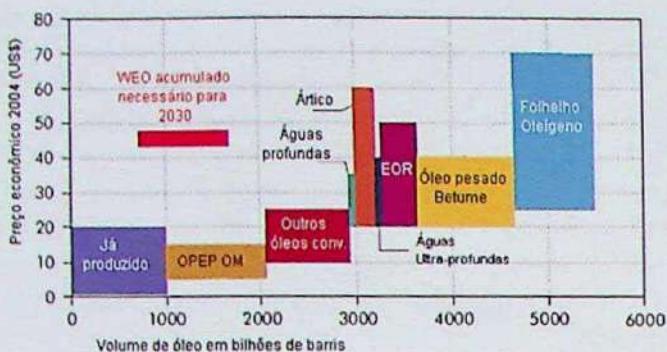


Figura 9 – Custos de referência incluindo o progresso tecnológico (IEA, 2005b)

Nota: WEO (World Energy Outlook) trata-se da demanda acumulada de petróleo necessária no período de 2003 a 2030 estimada pelo IEA (2004).

Recursos Não-Convencionais (óleo pesado, betume e folhelhos oleígenos) incluem os custos de mitigação do CO₂.

EOR – Recuperação avançada de óleo (Enhanced oil recovery)

abscissas representa o volume acumulado de recursos. Pode-se perceber neste tipo de representação o impacto das diferentes tecnologias necessárias para transformar os recursos em reservas. Essa projeção não é exata, pois apresenta somente uma amplitude de custos. Além disso, essas estimativas devem ser entendidas sob uma perspectiva de longo prazo de preços e custos dos equipamentos, serviços e infra-estrutura. Os efeitos recentes do ciclo elevado de preços e suas volatilidades devem ser avaliados com certa cautela na análise das diferentes alternativas quando comparado com as projeções de custos efetuadas pela IEA (2005b), que assumiu um preço de robustez (preço de longo prazo) entre US\$ 30 a US\$ 35 por bbl.

A correlação entre custos e preços e a sua relação entre o progresso tecnológico e a transformação de recursos em ativos petrolíferos envolve diferentes determinantes. Entretanto, caso um determinado tipo de recurso petrolífero (a partir de uma dada tecnologia) apresente viabilidade econômica, este fato não implica um aproveitamento imediato da futura jazida. Segundo Costa Lima e Suslick (2006), diversos fatores participam do processo decisório de investimento na exploração e produção de petróleo e gás natural, tais como: taxação, ambiente regulatório, fluxo de caixa das empresas, acesso ao subsolo, demanda e fatores geopolíticos.

ENERGIA E SUSTENTABILIDADE Os cenários futuros da demanda de energia apontam, ainda, para uma forte participação de recursos não-renováveis na matriz energética. As tendências indicam um crescimento importante das atividades de exploração e produção de hidrocarbonetos, bem como incorporação de recursos não-convencionais de petróleo que demandarão novas tecnologias para atenuar o impacto no meio ambiente.

Estima-se que as emissões de gases de efeito estufa (GEE) atingiram em 2004 um volume de 49 GtCO₂-eq (bilhões de toneladas de dióxido de carbono equivalente¹³) (IEA, 2006). Entretanto, energia é uma componente estratégica e indutora do desenvolvimento econômico e social. Dados da IEA (2005a) indicam que cerca de metade do consumo mundial de energia deve ser atribuído a apenas um bilhão de pessoas que vivem nos países da OCDE. Por sua vez, um bilhão de pessoas das faixas de renda mais baixas consomem tão somente cerca de 4% da energia consumida no mundo¹⁴.

Neste sentido, conforme salientado no inicio desse trabalho, o crescimento populacional associado ao incremento da qualidade de vida em países em desenvolvimento indica que a demanda de energia primária poderá dobrar até 2050, com evidentes impactos sobre as emissões de GEE. Embora o simples consumo de energia não assegure melhoria nas condições de vida das populações, há uma correlação direta entre o consumo de energia e os indicadores de qualidade de vida, por exemplo, o Índice de Desenvolvimento Humano (IDH). Segundo dados das Nações Unidas (UN, 2008), o consumo da energia é uma condição necessária para a melhoria da qualidade de vida, mas sob a perspectiva econômica, altos consumos específicos não estão associados a altos valores de IDH. Alguns países do norte da Europa detêm altos valores de IDH e elevado consumo de eletricidade per capita, mas um consumo específico baixo em base monetária. Este fato propicia boas oportunidades para incremento da atividade econômica e, consequentemente, melhoria da qualidade de vida, mantendo-se constante o nível relativo do consumo global de energia.

Em decorrência dos cenários previstos pelo IPCC (2007) as principais alternativas para redução das emissões de GEE envolvem alterações significativas na matriz energética, que deverão ser realizadas com a introdução de novas tecnologias de conversão e uso de energia. As principais alterações envolveriam o aumento de eficiência no uso final da energia (40%), captura e armazenamento de CO₂ (20%), uso da biomassa em transporte e eletricidade (12,6%), uso de mix de combustíveis substituindo aqueles mais intensivos em carbono por outros com menor intensidade (7,7%), energia nuclear (7,2%), hidrogênio e células de combustível (4,1%) e o uso de outras fontes renováveis na geração de eletricidade (8,4%).

Esses dados mostram que a eficiência energética no suprimento de energia, nos transportes, edificações, setor industrial e na agricultura terão peso preponderante na redução das emissões e que enfrentarão um índice reduzido de barreiras técnicas. Em que pese os custos elevados e a existência de alguns gargalos tecnológicos, avanços importantes foram realizados na área de seqüestro geológico de CO₂ (Klara & Byrer, 2003; Ravagnini & Suslick, 2008) que permitirão atenuar alguns dos principais impactos de GEE. Dados da IEA (2006) apontam com ressalvas que a

13 - Essa estimativa inclui as emissões globais de CO₂, CH₄, N₂O, HFCs, PFCs e SF₆ e os respectivos potenciais de aquecimento global enquanto fatores de ponderação (IEA, 2006).

14 - Estima-se que 2,4 bilhões de pessoas consomem apenas biomassa tradicional, i.e., lenha e resíduos vegetais e animais, em sistemas de baixa eficiência energética (IEA, 2005a).

energia nuclear pode contribuir de forma significativa para a redução das emissões de GEE. As principais ressalvas mencionam o desenvolvimento de novos reatores nucleares e de sistemas de controle e segurança, pois a opção nuclear enfrenta uma forte resistência da sociedade.

Como apontado nos itens anteriores, não existe o risco de escassez de oferta de recursos não-renováveis no médio ou no longo prazo. Constatase que o elemento estratégico seria avaliar se a renda dos cidadãos de nações pobres será ou não compatível com o seu desejo de atingir padrões de vida melhores, sem ultrapassar o nível sustentável de emissões. Além disso, outro grande desafio é se o desenvolvimento sustentável pode ser atingido sem fundamentalmente alterar o estilo de vida das pessoas.

Esse tipo de desafio envolve diferentes interpretações do conceito e do papel da sustentabilidade ou do desenvolvimento sustentável como meta a ser atingida, o que foge ao escopo desse trabalho. Mas, alguns dos princípios sobre a sustentabilidade e os impactos na renda fornecem algumas indicações. Segundo EOLSS (2002), a sustentabilidade está ancorada sobre seis princípios: eqüidade intergeracional, eqüidade intrageracional, estratégias de aversão ao risco, conservação da biodiversidade, internalização dos custos ambientais e instituições esclarecidas. É reconhecido que a eqüidade intergeracional tem sido uma preocupação maior dos países desenvolvidos, enquanto a eqüidade intrageracional continua ainda um grande desafio para as nações em desenvolvimento.

Não há dúvida de que os recursos não-renováveis são essenciais ao bem-estar da civilização atual, sendo componentes fundamentais de nosso estilo de vida (UNEP, 1997). Não obstante interesses políticos específicos, ações e atitudes que promovam a redução de emissão de gases de efeito-estufa e do desperdício de energia e de materiais serão benéficas para a sociedade. Os benefícios são tangíveis e intangíveis.

É imprescindível que a porção da sociedade que está à margem do desenvolvimento tenha acesso a uma oferta mais justa da energia e dos recursos não-renováveis, que, na verdade, podem ser caracterizados como insumos essenciais para o desenvolvimento e atendimento básico das suas necessidades. No entanto, esta oferta não deve reproduzir os efeitos negativos característicos do crescimento econômico da porção mais privilegiada da sociedade (e.g. poluição, desperdício, desigualdades, etc.).

A própria redução do consumo de bens e insumos oferece vantagens para o setor produtivo, possibilitando a quantificação de um valor tangível, resultando em volumes mensuráveis de redução de emissão de gases que alteram o clima terrestre. Com isso, as metas de redução de emissão e de uso sustentado dos recursos naturais e energéticos passam a oferecer boas oportunidades de negócios.

Portanto, há uma urgência no que diz respeito a mudanças de rumo nesses setores, principalmente visando a sustentabilidade e a diminuição dos desequilíbrios regionais. Existe, também, a necessidade de que sejam oferecidos caminhos simples, mais claros e bem definidos, e que sejam feitos arranjos institucionais que facilitem e motivem as iniciativas empresariais de sustentabilidade.

Uma definição adequada de desenvolvimento susten-

tável pressupõe que “o desenvolvimento atende às necessidades da geração atual sem comprometer as possibilidades das futuras gerações de satisfazer as suas próprias necessidades” (WCED, 1987). Esta definição possui uma orientação macroeconómica com foco nas mudanças do bem-estar da sociedade ao longo do tempo ao invés do bem-estar de um ecossistema ou de uma comunidade em particular. A preocupação com esta definição refere-se à possibilidade do perfil do consumo atual dos recursos não-renováveis levarem as futuras gerações a aceitarem um padrão de vida inferior. A justificativa básica deve-se à noção generalizada de que a exaustão dos recursos não-renováveis pode ameaçar o bem-estar das futuras gerações conforme ressaltado anteriormente.

Diversos estudos mostram que esse aspecto aponta que as relações entre a disponibilidade de recursos não-renováveis e o desenvolvimento sustentável não estão ainda muito bem definidas e delimitadas no processo de desenvolvimento (Tilton, 2002, Suslick et al., 2005). Pode-se inferir que o potencial para as futuras gerações usufruírem do mesmo padrão de vida que a geração atual depende dos ativos que passamos para o futuro. Recursos não-renováveis abundantes de baixo custo para a produção de energia são um dos inúmeros ativos. Pode-se incluir neste rol de ativos a tecnologia, o capital físico representado pelas indústrias e obras de infra-estrutura, capital humano (educação, saúde, etc.), o capital natural (meio ambiente limpo e uma rica biodiversidade), as instituições políticas e sociais (governo democrático e estável, sistema legal, etc.) e o capital cultural (ciência, literatura e artes em geral).

Desta maneira, observa-se que não somente a quantidade e qualidade, mas a disponibilidade mineral é um fator importante para que a sustentabilidade possa ser alcançada, mas não é uma garantia. As gerações atuais devem continuar investindo em novas tecnologias e agregando novas quantidades de reservas minerais para que as gerações futuras possam usufruir do seu consumo de energia, desfrutando de padrão semelhante, quiçá até superior, dentro de uma perspectiva sustentável.

Ao longo da história percebe-se que as gerações atuais desfrutam de um padrão de vida superior ao das gerações passadas, graças aos investimentos realizados e às tecnologias que proporcionaram um aumento da disponibilidade de bens minerais, principalmente nos países industrializados e nas camadas com maior renda dos países em desenvolvimento. Este fato levanta a seguinte questão: quanto à geração atual deve poupar e quanto deve ser investido para garantir um equilíbrio futuro? Embora esta estimativa não seja complexa de ser executada, observa-se, ainda, que uma parte substancial da população mundial não desfruta das condições mínimas de saúde, educação, habitação e alimentação. Portanto, investir nesses itens para essa faixa da população é também um investimento no futuro e que, inevitavelmente, deve participar do balanço intergeracional.

CONCLUSÕES As últimas décadas possibilitaram um bom aprendizado em relação à disponibilidade dos recursos não-renováveis. Constatase que a exaustão não

é um fenômeno instantâneo e, caso se torne um problema crítico no futuro, os custos (exploração, produção, etc..) deverão subir de forma gradual ao longo dos anos. Além disso, outros sinais deverão alertar a sociedade muito antes que ocorra o esgotamento físico e total dos recursos.

O custo de oportunidade baseado na visão da dotação mineral como fluxo representa uma expectativa mais otimista. A mudança tecnológica, a substituição, a reciclagem, as novas descobertas e outros fatores induzidos pelo sistema de preços são componentes reais e atuais do mundo moderno, e ajudarão a manter o desenvolvimento sustentável mesmo com o crescimento do nível de extração dos recursos não-renováveis.

Os recursos e reservas petrolíferas mostram um cenário favorável para atender a demanda de energia até 2030. Entretanto, grandes desafios são necessários para gerar novas tecnologias a custos competitivos, bem como promover redução dos impactos provocados pelos gases de efeito estufa para uma matriz de energia mais sustentável. Algumas propostas para redução desses impactos caminham no sentido dos governos imporem regulamentações rígidas visando restringir o uso dos recursos não-renováveis. A solução proposta de simplesmente internalizar os custos sociais e ambientais pode se tornar uma alternativa de execução complexa de ser implementada pelos organismos reguladores. Primeiro, o processo de inter-

nalização de custos demanda um maior conhecimento e desenvolvimento das técnicas para medir o valor do meio ambiente, bem como de outros bens sociais e serviços ambientais. Segundo, as políticas públicas devem desenvolver mecanismos eficientes para que os custos sociais e ambientais envolvidos na produção dos bens minerais possam ser internalizados, estimulando as empresas que promovam a redução desses custos e dos demais custos envolvidos na produção e no uso desses bens.

Diversos estudos mostram que esse aspecto aponta que as relações entre a disponibilidade de recursos não-renováveis e o desenvolvimento sustentável não estão ainda muito bem definidas e delimitadas no processo de desenvolvimento. Desta maneira, pode-se perceber que a disponibilidade de recursos não-renováveis é um pré-requisito importante para o desenvolvimento sustentável ser atingido, mas não é uma garantia. As gerações atuais devem continuar investindo em novas tecnologias e agregando novas quantidades de reservas minerais para que as gerações futuras possam usufruir do seu consumo dentro do conceito de sustentabilidade.

Agradecimentos: O autor gostaria de agradecer os comentários do Sérgio Iatchuk (PRH/ANP, Cepetro) e o apoio do CNPq e do Centro de Estudos de Petróleo – Cepetro/Unicamp para a realização deste trabalho.

Referências

- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO (ANP), 2000. Regulamento Técnico ANP nº 001/2000, Portaria nº 009 de 21 de Janeiro de 2000.14p. Disponível em: <http://www.anp.gov.br>. Acessado em 20/05/2002.
- Ahlbrandt,T.S.;Charpentier,R.R.;Klett,T.R.;Schmoker,J.W.;Schenk,C.J.;Ulmishek,G.F. 2005. *Global Resource Estimates from Total Petroleum Systems*. Tulsa , AAPG Memoir 86, The American Association of Petroleum Geologists, 324p.
- ANFAVEA, Anuário da Indústria Automobilística Brasileira, Brasil. Disponível em <http://www.anfavea.com.br>, Acessado em 12/07/2008.
- Attanasi, E.D., 1998. Economics and the 1995 National Assessment of United States Oil and Gas Resources. United States Geological Survey Circular 1145, Washington 1998, Disponível em: <http://pubs.usgs.gov/circ/1998/c1145/c1145.pdf>. Acessado em: 16/08/2002
- Auty, R.M., Mikesell, R.F., 1999. *Sustainable Development in the Mineral Economies*. Clarendon Press, Oxford, 285p.
- Cleennell, M. B. 2000. Hidrato de gás submarino: natureza, ocorrência e perspectivas para exploração na margem continental brasileira. *Revista Brasileira Geofísica*, 18(3):397-409.
- Costa Lima, G.A.; Suslick,S.B. 2006. Estimation of volatility of selected oil production projects, *Journal of Petroleum Science and Technology*, 54(3-4):129–139.
- Demirmen, F. 2007. Reserves Estimation: The Challenge for the Industry. *Journal of Petroleum Technology*, 59(5):80-89.
- DOE/EIA. 2008. Annual Energy Outlook 2008 with Projections to 2030, DOE/EIA-0383(2008), U.S. Department of Energy, Energy Information Administration, Washington, DC, 215p.
- EOLSS - ENCYCLOPEDIA OF LIFE SUPPORT SYSTEMS, 2002. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. UNESCO Publication.
- Gielen, D. Unander,F. 2005, Alternative Fuels: An Energy Technology Perspective, International Energy Agency. Disponível em: <http://www.iea.org/textbase/papers/2005/ETOAltFuels05.pdf>. Acessado em: 02/07/2008.
- Gielen,D.; Unander,F. 2004. The ETP Model. IEA – International Energy Agency, Disponível em: http://www.iea.org/textbase/speech/2004/dgfu_etp.pdf. Acessado em 02/05/2008.
- Greene, D. L, Hopson,J.L; Jia,L. 2003, Running out of and into oil: analyzing global oil depletion and transition through 2050, ORNL/TM 2003/259, Disponível em: http://cta.ornl.gov/cta/Publications/pdf/ORNL_TM_2003_259.pdf. Acessado em: 03/07/2008.
- Harrell, D. R.; Gardner, T. L. 2003. Significant Differences in Proved Reserves Volumes Estimated Using SPE/WPC Reserves Compared to United States Securities and Exchange Commission (SEC) Definitions. In: SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 1, Proceedings, 8p.
- Hilson, G., Murck, B., 2000. Sustainable Development in the Mining Industry: Clarifying the Corporate Perspective. *Resources Policy*, 26(4):227-238.
- Hotelling, H., 1931. The Economics of Exhaustible Resources. *Journal of Political Economy*, 39(2):37–175.
- IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2004, *The World Energy Outlook – 2004*, International Energy Agency- IEA, Paris, 580p.
- IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2005a, *The World Energy Outlook – 2005*, International Energy Agency, Paris, 577 p.
- IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2005b, *Resources to Reserves: Oil & Gas Technologies for the Energy Markets of the Future*. International Energy Agency, Paris, 124p.
- IEA – International Energy Agency. 2006. Energy Technolo-

- gy and Perspectives 2006 –Scenarios & Strategies to 2050. Paris. Disponível em <http://www.iea.org>. Acessado em 03/07/2008.
- IPCC. 2007. Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Jackson, PM. 2007, Peak Oil Theory Could Distort Energy Policy and Debate, *Journal of Petroleum Technology*, Feb, SPE.
- Klara S. & Byrer C. 2003. Carbon Sequestration through Enhanced Oil Recovery, Program Facts, U. S. Department of Energy, Office of Fossil Energy, National Energy Technology Laboratory. Disponível em: <http://www.netl.doe.gov/publications/factsheets/program/Prog053.pdf>. Acessado em 13/07/2008.
- Mäler, K.G., Gren, I.M., Folke, C., 1994. Investing in Natural Capital: The Ecological Economics Approach to Sustainability. In: Jansson, A.M., Hammer, M., Folke C. e Costanza, R. (eds) ISEE/Island Press, Washington, DC. p. 233-249.
- NPD - Norwegian Petroleum Directorate, 2001. The petroleum resources on the Norwegian continental shelf 2001. Doc. YA-800. Norwegian Petroleum Directorate Publication, Stavanger, Norway, p.43-47.
- Pereira, W. C.; Suslick, S.B. 2003 .Modelo de previsão do custo de mineração pelo sistema de curvas de aprendizado. *REM: Rev. Esc. Minas*, 56(2): p.139-143.
- PROPES, 2007 Programa de Óleos Pesados Offshore, folder, Petrobras, Cenpes.
- Ravagnani, AT.F.S., Suslick,S.B. 2008. Modelo Dinâmico de Seqüestro Geológico de CO₂ em Reservatórios de Petróleo. *Revista Brasileira de Geociências*, (no prelo).
- Rogner, H. H.,1997. An Assessment of World Hydrocarbon Resources, *Annual Reviews of Energy and Environment*, 22:217-262.
- Ross, J. G. 2001. SPE /WPC/AAPG Resources Definitions as a Basis for Portfolio Management, SPE paper 68573. In: SPE Hydrocarbon Economics and Evaluation Symposium, 1, Proceedings, 7 p.
- SOCIETY OF PETROLEUM ENGINEERS (SPE); WORLD PETROLEUM COUNCIL(WPC). 1997. About Oil and Gas: Petroleum Reserves and Resources Definitions. [S.I]: SPE, 1997. Disponível em: <<http://www.spe.org>>. Acesso em: 02 maio 2006.
- SOCIETY OF PETROLEUM ENGINEERS(SPE), 2008. Petroleum Resources Classification and Definitions. Disponível em <http://www.spe.org>. Acesso em 15 julho 2008.
- SOCIETY OF PETROLEUM ENGINEERS, PETROLEUM(SPE), 2007, Resources Management System, Disponível em: <<http://www.spe.org>>. Acesso em: 12 julho 2008.
- Suslick, S.B.; Machado,I.F.; Ferreira,F.D., 2005, *Recursos Minerais e Sustentabilidade*, Ed.Komedi, Campinas, 246p.
- Tilton, J.E., 2002. *On Borrowed Time? Assessing the Threat of Mineral Depletion*, Resources for the Future, Washington,DC, 158p.
- Trevisan,O.V.; França,F.A.;Okabe, C.A.; Lisboa, A.C. 2007. Elements of a Technology Development Program on Heavy Oil, *Terraes*, 3(1), 15p.
- United Nations (UN), 2008. Human Development Report—HDR 2007. Disponível em [<http://www.undp.org>]. Acessado em 20/07/2008.
- UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS), 2000. USGS World Energy Assessment Team, USGS Digital Data Series – DDS – 60, 4, CD-Rom.
- UNITED STATES SECURITIES AND EXCHANGE COMMISSION (US-SEC). 1978 Regulation S-X, Rule 4-10: Financial Accounting and Reporting for Oil and Gas Producing Activities Pursuant to the Federal Securities Laws and the Energy Policy and Conservation Act of 1975. Washington, DC: U.S. SEC, 1978. Disponível em: <<http://www.sec.gov>>. Acesso em 02 maio 2008.
- WORLD COMMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT(WCED). 1987. Our Common Future, Oxford University Press, 1987.

A emergência da tecnourbesfera e os novos desafios da geologia urbana

Rualdo Menegat

Instituto de Geociências da UFRGS, e-mail: rualdo.menegat@ufrgs.br

A emergência da tecnourbesfera e os novos desafios da geologia urbana

Rualdo Menegat

Resumo Pela primeira vez na história humana, a população urbana ultrapassou a rural. A escalada da urbanização é maior em países de regiões menos desenvolvidas e, hoje, as megacidades se distribuem em todos os continentes. Porém, os maiores desafios da geologia urbana estão colocados para o entendimento das megalópoles e, mesmo, para a cidade-múndi ou ecumenópole. O presente trabalho busca apresentar as várias escalas do processo de urbanização com o intuito de investigar as relações da cidade-múndi com os demais componentes que formam os sistemas superficiais da Terra. A tecnourbesfera é definida como a totalidade física urbana que inclui o sistema construído e as porções da litosfera, hidrosfera, atmosfera e biosfera, por ela transformadas. A tecnourbesfera como fenômeno de dimensões geológicas não é observada na escala do indivíduo, requerendo procedimentos e conceitos tecno-científicos. Disso resulta a importância dos levantamentos e diagnósticos temáticos da totalidade urbana com o intuito de oferecer aos cidadãos e gestores das cidades instrumentos adequados para o entendimento da complexidade urbana contemporânea. Para tanto, faz-se uso de exemplos como o Atlas Ambiental de Porto Alegre, que trouxe novas visões para a gestão e educação ambiental na capital gaúcha.

Palavras-chave: Geologia urbana, megacidade, tecnourbesfera, gestão ambiental urbana, educação ambiental

Abstract THE DAWN OF TECHNOURBANSHERE AND THE NEW CHALLENGE OF URBAN GEOLOGY

For the first time in the human history, the world's population becomes more urban than rural. The ascent of urban realm in the next 30 years is expected to occur in least development countries. The central challenge for the urban geology is to consider the many problems due to the complex relations between urban and geolandscape. The main goal of this paper is to describe the ascent of cities' scales – from city and megacity to megalopolis and ecumenopolis – in order to describe connections between the physical world-city or ecumenopolis and the others components of the Earth superficial systems, like as lithosphere, hydrosphere, atmosphere, and biosphere. The technourbansphere is defined as the urban physical totality, which includes the manmade system and the lithosphere, hydrosphere, atmosphere, and biosphere's portions transformed by it. Due to geologic scale of all technourbansphere, it is not possible to observe it by a citizen without technical and geoscientific concepts and instruments. To offer to citizens and decisions makers accurate instruments to understand the nowadays urban's complexities, thematic surveys of the urban physical totality is very important. This possibility is showed by the Environmental Atlas of Porto Alegre case, which triggered new looks in urban environmental management and education in Porto Alegre city, Southern Brazil.

Keywords: Urban geology, megacity, technourbansphere, urban environmental management, environmental education

Man's advent has not been a mere solitary fact, nor have the alterations which he has effected been confined solely to the relations that subsist between himself and nature. He has set in motion a series of changes which have reacted on each other in countless circles, both through the organic and inorganic world. Nor are they confined to the past; they still go on; and, as years roll away, they must produce new modifications and reactions, the stream of change ever widening, carrying with it man himself, from whom it took rise, and who is yet in no small degree involved in the very revolutions which he originates.

SIR ARCHIBALD GEIKIE (1901, p. 425.)

INTRODUÇÃO Durante muito tempo, a cidade foi sinônimo de progresso humano e material. Desde Jericó, que se ergueu há onze mil anos no vale do rio Jordão, as cidades foram promessa de civilidade, proteção, alimento, força, construção, esperança. Palavras que remetem para o significado do termo latino *sustinere*, donde derivou o vocabulário *sustentável*. Nas ruas, calçadas e habitáculos urbanos acalentaram-se as utopias mais generosas de liberdade

e humanismo. Também aí nasceram a filosofia, a ciência, a religião, as artes, os esportes, o livro e a democracia. Os principais valores que a civilização transfere de geração para geração são indissociáveis da vida urbana.

Quando olhamos esse passado e o contrastamos com as cidades atuais, logo nos deparamos com um contra-senso. O vocábulo *cidade* já não corresponde ao étimo latino *civitas*, que também remete para a idéia de civilidade, urbanidade, benignidade. Mas ao contrário disso: violência, fome, pobreza, doença, destruição. Palavras que, em seu conjunto, aludem para o significado de *insustentável*.

Na raiz dos problemas ambientais e urbanos contemporâneos, sejam planetários ou locais, está o modo como a cidade é entendida pelos seus habitantes, gestores e *intelligentsia*. Embora a cidade seja o artefato humano mais complexo (Mumford, 1998[1961]; Girardet, 1992), a questão urbana é usualmente endereçada apenas aos urbanistas e, a partir de Patrick Geddes (1915), Escola de Chicago (Park et al., 1925) Lewis Mumford (1934), Arnold Toynbee (1967) e Constantinos Doxiadis (1968), também para sociólogos, historiadores e geógrafos (e.g., Gottdiener e Mutchison, 2006; Welter, 2003; Theodorson, 1982).

A cidade como fato geográfico ganhou contornos na época em que um dos maiores intelectuais do Novo Mundo, Lewis Mumford [1895-1990], escreveu em 1938 *The culture of the cities*. Nesse livro, Mumford (1970[1938], p. 316) afirmou que a cidade é uma forma terrena e expressão da individualidade regional. Mesmo quando é muito grande, “a sua forma é condicionada pela topografia e pela natureza da terra”. Uma das grandes contribuições científicas de Mumford foi a de endereçar a questão da cidade a todas as disciplinas e atividades humanas, devido à complexidade do artefato urbano e suas relações com a paisagem, a técnica, a sociedade e a natureza humana (Mumford, 1952[1944]; 1998[1961]; 1970[1964]).

Nas décadas posteriores, a questão das cidades passou a fazer parte da preocupação de muitas outras áreas científicas, como Ecologia Humana, Ecologia de Paisagem, Antropologia e Geologia. Em todas elas vamos encontrar contribuições do biólogo escocês Patrick Guedes [1854-1932] e do nova-iorquino Lewis Mumford.

Sobre a importância da geologia no estabelecimento das características arquitetônicas e individuais da cidade, Mumford mostrou-nos que

Em momento algum, na existência da cidade, o divórcio entre o ambiente construído pelo homem e a terra é completo. O arenito vermelho de Estrasburgo, a argila amarela de Londres, os tijolos vermelhos de Bremen, o calcário cinzento da Paris pós-medieval, o arenito acastanhado da antiga Frankfort-am-Main – os próprios tijolos e pedras simbolizam a associação fundamental entre o homem e a natureza, que é aceita e estimulada, ao mesmo tempo em que está sendo transformada na estrutura da cidade (Mumford, 1970[1938], p. 318).

Na relação indissociável da cidade e o meio geológico, Mumford foi mais longe ainda, ao analisar a influência da geologia na formação da consciência dos habitantes urbanos e nos aspectos internos da cidade, como a distribuição das edificações, como podemos ver a seguir:

Os substratos geológicos imediatos permanecem sempre como um atributo importante da individualidade urbana; eles penetram na consciência dos indivíduos por meio de uma variedade de modos indiretos. A própria criança que brinca, ao cavar o solo no seu quintal, está consciente da ubiquidade da areia se ela vive em Rotterdam; do folhelho oleoso, se está em Pittsburgh, ou do brilho tentador da mica no xisto de Manhattan. E, à medida que as cidades se desenvolvem, as condições externas transformam-se em influências internas [...]. (Mumford, 1970[1938], p. 318-19).

A Geologia Urbana, como disciplina, emergiu de forma associada à Geologia de Engenharia a partir da década de 1960, quando o gigantismo urbano já se delineava de forma incontestável. Um dos trabalhos pioneiros foi escrito, em 1964, pelo geólogo John T. McGill com o título *Growing importance of urban geology*, e publicado em um Boletim do Serviço Geológico dos Estados Unidos. Quatro anos depois, ocorreu a primeira sessão de geologia

de engenharia no âmbito de um Congresso Internacional de Geologia, a qual teve o título “*Geologia de Engenharia no planejamento regional*” (Legget, 1973). A partir disso, os trabalhos em geologia urbana passaram a ser cada vez mais freqüentes. Em 1973, o professor inglês Robert Ferguson Legget [1904-1994], então membro do Conselho Nacional de Pesquisa do Canadá, publicou o clássico manual *Cities and Geology* (Legget, 1973), consolidando o caminho na definição do escopo da Geologia Urbana.

Por continuada influência desses trabalhos pioneiros, o Serviço Geológico do Canadá, entre outros, definiu programas prioritários em Geologia Urbana, e considera que o objetivo dessa área é “prover engenheiros, planejadores, tomadores de decisão e o público em geral com as informações geocientíficas necessárias para um adequado planejamento regional em áreas densamente povoadas” (GSC, 2007). A geologia urbana tem, ainda, a importante meta de elaborar modelos tridimensionais com todas as características dos terrenos e explicar os processos geológicos envolvidos no equilíbrio dinâmico do meio ambiente local. Para tanto, ela deve trabalhar de forma interdisciplinar, reunindo contribuições de diversas áreas das ciências da Terra – como hidrologia, geologia de engenharia, geoquímica, estratigrafia, geomorfologia, geologia estrutural, etc. – e outras ciências – como história, arqueologia, economia, ecologia de paisagem, entre outras.

Nesse artigo, procurarei apontar brevemente os elementos que fazem da cidade um fato geológico local e global. Quer dizer, de como a geologia contribui não apenas do ponto de vista técnico com a construção e o planejamento urbano e a busca de soluções aos diversos problemas ambientais, mas também como aporta uma expressiva ajuda para o entendimento da totalidade urbana contemporânea. Essa totalidade será apresentada em termos de um gigantesco sistema físico urbano global, que inclui, além das edificações, as porções modificadas das demais esferas planetárias com as quais ele estabelece uma interface. O sistema físico urbano global (ou o reino urbano) é chamado de *tecnourbesfera*. A partir dessas premissas, procurar-se-á esboçar a importância dos levantamentos de dados e de sistemas de informações da geopolisagem para o planejamento, gestão e educação ambiental nas grandes cidades. Para tanto, far-se-á uso da experiência desenvolvida por meio do *Atlas Ambiental de Porto Alegre* (Menegat et al., 2006).

TERRA URBIS: CRESCIMENTO E ESCALAS DE CIDADES NO MUNDO URBANIZADO A totalidade do sistema urbano é composta por vários elementos físicos, naturais e construídos, sociais e culturais que interagem dinamicamente na paisagem através do tempo. Usualmente, essa totalidade é vista apenas em seus aspectos mais simples e evidentes. Seja pela trama de ruas e avenidas, que comparece em nosso cotidiano como endereços, seja pelos padrões construtivos que compõem o mosaico de bairros. Ambos aspectos são representados por apenas duas dimensões em mapas ou plantas da cidade. Em termos de seus elementos físicos, a cidade é referida ainda pela tipologia e estética de suas edificações e qualidade da mobilidade urbana, dominada pelo uso intensivo de automóveis. Grande parte dos planos diretores urbanos não vai

além da normatização desses parâmetros.

As cidades são também dimensionadas pela quantidade de habitantes. Durante todo o século XX, as cidades buscaram ser sinônimo de grandeza física e populacional. O objetivo das cidades pequenas era serem médias, e a meta destas, residia em tornarem-se grandes. Por sua vez, as cidades grandes planejavam transformar-se, o mais rápido possível, em metrópoles, as quais, por seu turno, disputavam o título de "a maior do mundo". No início do século XIX, impulsionada pela revolução industrial, as riquezas coloniais e a energia obtida com o carvão, Londres tornou-se a primeira cidade a atingir a cifra de um milhão de habitantes (Girardet, 1992), que, até então, havia sido conquistada apenas pela Roma antiga, no século I a.C (Fleming, 1993). Por seu turno, Nova York foi a primeira cidade a alcançar dez milhões de habitantes, no período entre as guerras mundiais. Além do tamanho, expresso em termos de quantidade populacional, as cidades também disputam a altura e gigantismo de edificações, extensão de avenidas e túneis, entre outros. A evolução do crescimento desses índices urbanos é usualmente referida como progresso, noção que perdura ainda hoje.

A metrópole sem limites: a era das cidades gigantes ou das megacidades Essa lógica de crescimento urbano, que foi inflacionário durante os séculos XIX, em regiões mais desenvolvidas, e XX, nas regiões menos desenvol-

vidas, levou ao aumento da população mundial urbana (ONU, 2007) e ao gigantismo desmesurado e sem precedentes das cidades (Bell & Tyrwhitt, 1972a, Dogan & Kasarda, 1988a, 1988b; Mumford, 1998; Hardoy *et al.*, 2001; Montgomery *et al.*, 2004). Em 1950, havia treze cidades com mais de quatro milhões de habitantes, sendo que as três primeiras – Nova York, Londres e Xangai – já abrigavam mais de dez milhões. Como pode ser acompanhado nas tabelas 1 e 2, no ano de 1985, o número de megacidades pulou para 35 e, nos quinze anos seguintes, ele quase duplicou: no ano 2000, havia mais de sessenta megacidades. Em 2007, a quantidade de megacidades já se encontrava na casa de 86 (Brinkhoff, 2007), das quais, dezenove com mais de dez, seis com mais de vinte, e uma com mais de trinta milhões de habitantes. Essa tendência continuará aumentando ainda mais nas próximas décadas. As projeções indicam que, em 2025, deverão existir cerca de 140 megacidades (ONU, 1985; Dogan & Kasarda, 1988c), as quais concentrarão uma população de 1.255 milhões de habitantes (ver Tabela 2).

Segundo o Departamento de Questões Econômicas e Sociais do Secretariado da ONU (UNDESA, Department of Economic and Social Affairs of the United Nations Secretariat), pela primeira vez no ano de 2008 a população urbana do planeta ultrapassou a população rural (ONU, 2008). Entre 2007 e 2050, projetou-se um crescimento da população mundial de 2,5 bilhões de habitantes, passando

Tabela 1 – As maiores metrópoles do mundo de 1950 a 2007, hierarquizadas pelo tamanho de sua população e região metropolitana. As aglomerações metropolitanas grifadas pertencem à países menos desenvolvidos. [Fonte: ONU, 1985; Dogan & Kasarda, 1988c; Brinkhoff, 2007.]

	METRÓPOLE	1950 POP.	METRÓPOLE	1985 POP.	METRÓPOLE ¹	2007 POP.
1	Nova York, EUA	12,4	México, México	18,1	Tóquio/Yokohama, Japão	33,6
2	Londres, Inglaterra	10,4	Tóquio/Yokohama, Japão	17,2	Seul, Coréia do Sul	23,4
3	Xangai, China	10,3	São Paulo, Brasil	15,3	México, México	22,4
4	Ruhr-Reno, Alemanha	6,9	Nova York, EUA	15,3	Nova York, EUA	21,9
5	Tóquio/Yokohama, Japão	6,7	Xangai, China	11,8	Bombaim, Índia	21,6
6	Pequim, China	6,7	Calcutá, Índia	11,0	Deli, Índia	21,5
7	Paris, França	5,5	Buenos Aires, Argentina	10,9	São Paulo, Brasil	20,6
8	Tianjin, China	5,4	Rio de Janeiro, Brasil	10,4	Los Angeles, EUA	18,0
9	Buenos Aires, Argentina	5,3	Seul, Coréia do Sul	10,2	Xangai, China	17,5
10	Chicago, EUA	5,0	Bombaim, Índia	10,1	Osaka, Japão	16,7
11	Moscou, Rússia	4,8	Los Angeles, EUA	10,0	Cairo, Egito	16,1
12	Calcutá, Índia	4,4	Londres, Inglaterra	9,8	Calcutá, Índia	15,7
13	Los Angeles, EUA	4,1	Pequim, China	9,2	Manila, Filipinas	15,6
14	Osaka/Kobe, Japão	3,8	Ruhr-Reno, Alemanha	9,2	Jacarta, Indonésia	15,1
15	Milão, Itália	3,6	Paris, França	8,9	Karachi, Paquistão	15,1
16	Rio de Janeiro, Brasil	3,5	Moscou, Rússia	8,7	Guangzhou, China	14,7
17	México, México	3,1	Cairo, Egito	8,5	Buenos Aires, Argentina	13,6
18	Filadélfia, EUA	3,0	Osaka-Kobe, Japão	8,0	Moscou, Rússia	13,5
19	Bombaim, Índia	2,9	Jacarta, Indonésia	7,9	Pequim, China	12,8
20	Detroit, EUA	2,8	Tianjin, China	7,8	Dacca, Bangladesh	12,6
21	São Paulo, Brasil	2,8	Deli, Índia	7,4	Rio de Janeiro, Brasil	12,3
22	Nápoles, Itália	2,8	Bagdá, Iraque	7,2	Teerã, Irã	12,1
23	São Petersburgo, Rússia	2,6	Teerã, Irã	7,2	Londres, Inglaterra	12,0
24	Manchester, Inglaterra	2,5	Manila, Filipinas	7,0	Istambul, Turquia	11,8
25	Birmingham, Inglaterra	2,5	Milão, Itália	7,0	Lagos, Nigéria	10,1
26	Cairo, Egito	2,5	Chicago, EUA	6,8	Paris, França	10,0
27	Boston, EUA	2,3	Istambul, Turquia	6,8	Chicago, EUA	9,8
28	Shenyang, China	2,2	Karachi, Paquistão	6,8	Shenzhen, China	9,1
29	Berlim, Alemanha	2,2	Lima, Peru	5,7	Bangkok, Tailândia	8,6
30	São Francisco, EUA	2,0	Bangkok, Tailândia	5,5	Wuhan, China	8,6
31	Leeds-Bradford, Inglaterra	1,9	Madras, Índia	5,2	Bogotá, Colômbia	8,5
32	Glasgow, Escócia	1,9	Hong Kong, China	5,1	Lima, Peru	8,2
33	Jacarta, Indonésia	1,8	Madrid, Espanha	5,1	Nagoya, Japão	8,2
34	Hamburgo, Alemanha	1,8	São Petersburgo, Rússia	5,1	Kinshasa, Congo	8,2
35	Viena, Áustria	1,8	Dacca, Bangladesh	4,9	Washington, EUA	8,2

1- Dados de Brinkhoff (2007) incluem o aglomerado urbano adjacente à metrópole.

Tabela 2 – População total e número de cidades por categoria de tamanho populacional, de 1950 a 1985 e projeções até 2025. [Fonte: ONU, 1985; Dogan & Kasarda, 1988c.]

ANO	POPULAÇÃO TOTAL POR CATEGORIA (em milhões de habitantes)			NÚMERO DE CIDADES POR CATEGORIA			
	>4	2-4	1-2	>4	2-4	1-2	total
1950	87,8	47,0	65,5	13	17	48	78
1960	136,3	67,0	95,9	19	26	69	114
1970	186,9	109,2	136,1	23	39	98	160
1980	281,4	140,9	182,3	35	51	136	222
1985	341,6	154,4	219,1	42	56	158	256
1990	405,6	198,0	246,7	48	72	178	298
2000	587,3	290,3	326,4	66	106	236	408
2010	823,7	380,0	399,0	90	139	282	511
2025	1.255,0	193,2	457,1	135	182	322	639

de 6,7 para 9,2. No mesmo período, a população urbana aumentará 3,1 bilhões de habitantes, passando de 3,3, em 2007, para 6,4 bilhões, em 2050 (ONU, 2008). Ou seja, nas próximas quatro décadas, a população urbana mundial praticamente duplicará de tamanho (Figura 1), passando a ser quase 70% da população total (Tabela 4). Para absorver esse incremento da população urbana, estima-se que o número de megacidades estará perto de nada menos do que três centenas (Brinkhoff, 2007). Grande parte dessa expansão ocorrerá em cidades de regiões menos desenvolvidas (ver Figura 2). Calcula-se que na Ásia a população urbana deva aumentar 1,8, enquanto que na África, 0,9 e na América Latina e Caribe, 0,2 bilhões de habitantes nesse mesmo período (ONU, 2008).

Esse crescimento excessivo em tão curto intervalo de tempo tem colocado em cheque a própria definição de megaciadade, cujo termo é também utilizado como sinônimo de “supercidade”, “cidade gigante”, “conurbação” (Bell & Tyrwhitt, 1972) e “megalópole” (Gilbert, 1986). O critério de Dogan e Kasarda (1988a) inclui nessa categoria aglomerações urbanas com mais de quatro milhões de habitantes. No entanto, outros estudos reservam o termo de “supercidade” para aglomerados com mais de cinco milhões (Lowder, 1987) ou “megalópole”, quando qualquer área urbana contínua tiver mais de dez milhões de habitantes (Mayhew & Penny, 1992) ou, ainda, “megaciadade”, quando a população ultrapassar mais de oito milhões de habitantes (ONU, UNDIESA, 1986).

Cadeias de cidades gigantes ou megalópoles: quanto grande pode ser uma megaciadade? As megaciadades, por seu turno, também tendem a aglomerar-se, formando gigantescas cadeias urbanas, que são denominadas de *megalópoles* (Gottman, 1961; Doxiadis, 1967, 1974, Bell & Tyrwhitt, 1972a). As três maiores cadeias urbanas existentes hoje impressionam pela magnitude de sua extensão geográfica e concentração populacional, pois cada qual está próxima de reunir a atordoante cifra de cem milhões de habitantes.

A primeira megalópole situa-se na região costeira nordeste dos Estados Unidos da América. Ela engloba o conjunto de cidades que se dispõem ao longo de um corredor

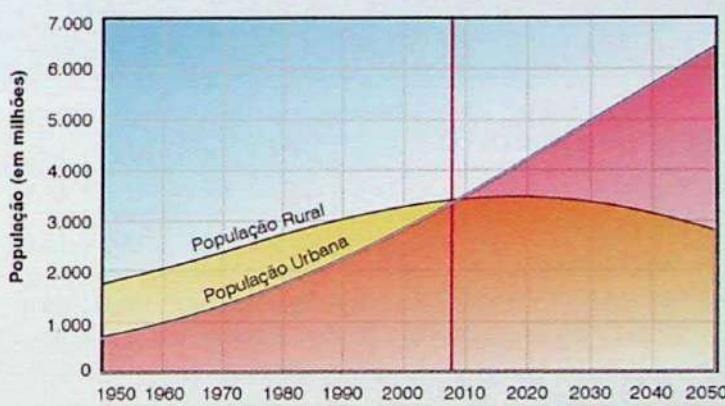


Figura 1 – População urbana e rural no mundo, 1950 a 2050. (Fonte: ONU, 2008.)

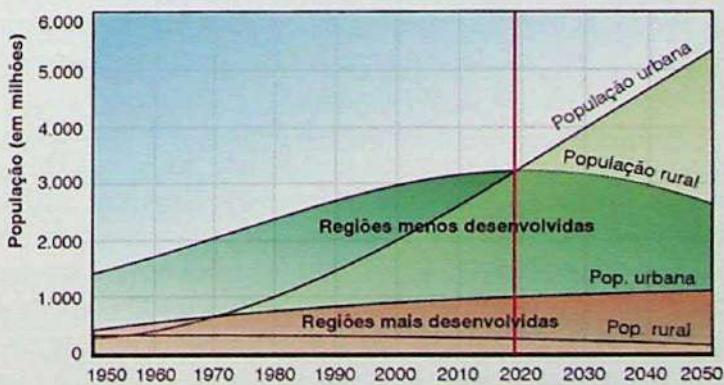


Figura 2 – Populações urbanas e rurais por região de desenvolvimento, de 1950 a 2050. (Fonte: ONU, 2008.)

com cerca de 800 km de comprimento que vai de Boston até a capital Washington, incluindo aí também as cidades e megaciadades de Providence, Hartford, Nova York, Filadélfia e Baltimore. Essa extensa e populosa corrente urbana, que ocupa as terras baixas entre a embainhada orla litorânea e as elevações dos Apalaches setentrionais, possui cerca de 100 km de largura média e pode ser bem visualizada na Figura 3. Essa cadeia urbana foi pioneiramente diagnosticada em 1961 por Jean Gottman (1961).

Tabela 3 – População mundial total, urbana e rural por região de desenvolvimento, em 1950, 1975, 2007 e projeção para 2025 e 2050. [Fonte: ONU, 2008.]

CATEGORIA	POPULAÇÃO (em bilhões)					TAXA MÉDIA DE CRESCIMENTO ANUAL (%)			
	1950	1975	2007	2025	2050	1950/1975	1975/2007	2007/2025	2025/2050
POPULAÇÃO MUNDIAL TOTAL	2,54	4,08	6,67	8,01	9,19	1,90	1,54	1,02	0,55
Regiões mais desenvolvidas	0,81	1,05	1,22	1,26	1,25	1,01	0,48	0,16	-0,04
Regiões menos desenvolvidas	1,72	3,03	5,45	6,75	7,95	2,26	1,84	1,19	0,65
POPULAÇÃO MUNDIAL URBANA	0,74	1,52	3,29	4,58	6,40	2,89	2,42	1,84	1,33
Regiões mais desenvolvidas	0,43	0,70	0,91	0,99	1,07	1,98	0,81	0,49	0,30
Regiões menos desenvolvidas	0,31	0,82	2,38	3,59	5,33	3,88	3,35	2,27	1,58
POPULAÇÃO MUNDIAL RURAL	1,80	2,56	3,38	3,43	2,79	1,41	0,87	0,08	-0,82
Regiões mais desenvolvidas	0,39	0,35	0,31	0,26	0,17	-0,44	-0,32	-0,94	-1,67
Regiões menos desenvolvidas	1,41	2,21	3,06	3,16	2,62	1,80	1,02	0,17	-0,75

Tabela 4 – Percentual de população urbana por região de desenvolvimento, em 1950, 1975, 2007 e projeção para 2025 e 2050. [Fonte: ONU, 2008.]

REGIÃO DE DESENVOLVIMENTO	Porcentagem de população urbana				
	1950	1975	2007	2025	2050
MUNDO	29,1	37,3	49,4	57,2	69,6
Regiões mais desenvolvidas	52,5	67,0	74,4	79,0	86,0
Regiões menos desenvolvidas	18,0	27,0	43,8	53,2	67,0

Ao descrever esse fenômeno urbano, então com população e extensão bem menores que as atuais, colocou o nome de *megalópolis*. Na década de 1980, a agluturação de cidades nessa região ainda era uma dúvida, como escreveu o professor David Leveson: “As áreas urbanizadas ao longo da costa nordeste dos Estados Unidos podem eventualmente coalescer para formar uma megalópole” (Leveson, 1980, p. 5, grifos nossos).

A segunda cadeia urbana pode ser identificada na Europa pelo eixo que se inicia em Berlim, passa por Dortmund-Duisburg-Düsseldorf, Amsterdã, Bruxelas, bifurcando-se, ao norte, até Londres, que está conectada ao continente por meio do Eurotúnel sob o Canal da Mancha (50,5 km), e, ao sul, até Paris (Bell & Tyrwhitt, 1972a). Essa cadeia urbana com cerca de mil quilômetros de extensão assenta-se sobre as terras baixas da costa atlântica da Europa setentrional.

Por fim, a terceira megalópole localiza-se no Japão, sendo formada pela corrente de aglomerados urbanos que vai de Saitama-Tóquio-Yokohama, ao norte, alongando-se para o Sul até Osaka-Kobe, em uma extensão com cerca de 430 km (Bell & Tyrwhitt, 1972b, Nagashima, 1972). Essa cadeia, também conhecida como Tokaidai, desenvolve-se na estreita faixa de terras baixas delimitada pelas encostas montanhosas, a oeste, e pelo litoral recortado por baías, a leste.

Hoje, existem seis megalópoles com mais de vinte milhões de habitantes. Além daquelas descritas acima, incluem-se: a megaciudad dos Grandes Lagos (Chicago-Detroit-Cleveland-Pittsburgh), o eixo Xangai-Nanking;

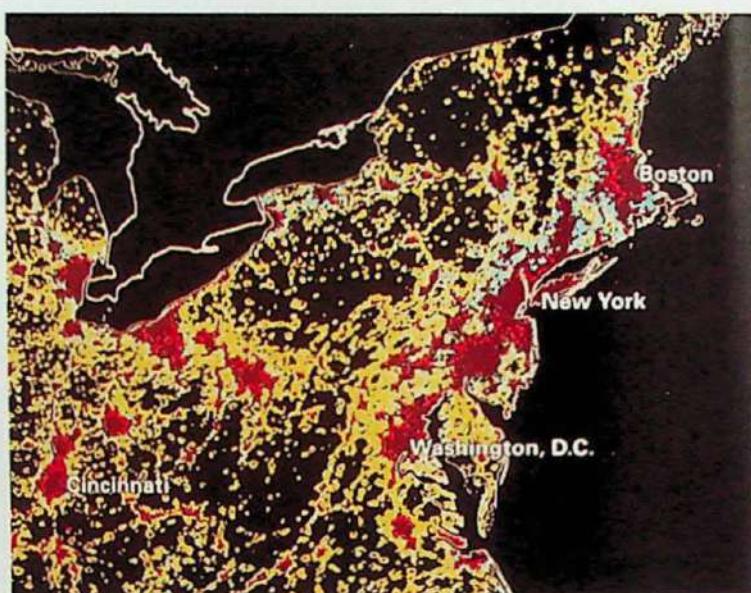


Figura 3 – A megalópole de Boston-Nova York-Washington se destaca no mapa do esparame urbano da região costeira nordeste dos EUA. O mapa foi elaborado a partir da composição de imagens de satélite captadas à noite. As cores vermelha e amarela identificam, respectivamente, zonas de intensa e moderada ocupação depois de 1993. As cores vermelha-escura e azul revelam zonas de intensa e moderada ocupação antes de 1993. [Fonte: Mitchell, 2001; National Geographic Maps; Defense Meteorological Satellite Program/NOAA-EUA.]

e o eixo Pequin-Tientsin (Bell & Tyrwhitt, 1972). Nas próximas décadas, há a tendência de formarem-se muitas outras (Papaioannou, 1964; Bell & Tyrwhitt, 1972). Na costa oeste dos Estados Unidos, por exemplo, o corredor que vai de Los Angeles a São Francisco apresenta essa forte vocação (Zellner & Ruby, 2000). Na América do Sul, destaca-se o cordão que se prolonga desde o Rio de Janeiro até São Paulo-Campinas, podendo envolver ainda Belo Horizonte (ver Figura 4).

A natureza cercada pela cidade: a ecumenópole ou a cidade-mundi As megalópoles são bem visualizadas no mapa-mundi resultante da composição de inúmeras imagens de satélite obtidas à noite e selecionadas sem nuvens (ver Figura 4). A imagem, produzida pela equipe do De-



Figura 4 – Mapa da ecumenópole, resultante da composição de imagens de satélite obtidas à noite entre 1994 e 1995. Nessa gigantesca cidade-múndi, vivem cerca de 3,7 bilhões de habitantes, mais da metade da população mundial. [Fonte: Defense Meteorological Satellite Program/NOAA-EUA.]

fense Meteorological Satellite Program (NOAA/DMSP) dos EUA, a partir de dados de satélite equipado com o *Operational Linescan System* (OLS) obtidos entre 1994 e 1995, é um dos mais expressivos produtos científicos da atualidade. Ela pode ser comparada em sua importância à primeira fotografia de toda Terra obtida pelos astronautas da Apolo 17 ou aos primeiros mapas-múndi que representavam com uma nova cartografia a descoberta das Américas, no Renascimento.

No mapa-múndi das luzes das cidades da Terra, as megalópoles apresentam-se conectadas a uma rede de cidades que cobre os cinco continentes. A ausência de luz sobre os continentes identifica lugares pouco habitados por que muito inóspitos. Esse impressionante mapa da cidade-múndi, mostra a extensão em escala geológica da humanidade urbanizada.

A cidade-múndi foi inicialmente proposta, em 1961, pelo influente urbanista grego Constantinos Doxiadis [1913-1975] como uma projeção futurista (ver Figura 5). De forma visionária, ele ponderou que haveria um limite máximo para o crescimento populacional, dada a finitude dos recursos do planeta, estipulado entre 20 e 50 bilhões de habitantes. Esse limite deveria, segundo suas previsões, ser alcançado no final do século XXI. Doxiadis (1967, p. 352) propôs, ainda, que “na medida em que a cidade alcançasse sua população máxima, e, portanto, também sua máxima dimensão física, ela ficaria em equilíbrio.”

Com o nome generoso de *ecumenópole*, assim descreveu a então futura cidade-múndi:

A cidade do futuro terá a forma de uma rede de dimensão mundial. Os centros da rede de maior hierarquia serão localizados principalmente onde hoje se encontram as maiores concentrações populacionais, isto é,

nas mais extensas planícies onde se encontram os melhores recursos hídricos. As conexões entre elas seguirão as linhas naturais de comunicações bem como de túneis submarinos e subterrâneos e os correspondentes corredores aéreos. (Doxiadis, 1967, p. 352.)

Posteriormente, em 1974, publicou um livro em que afirmava ser a ecumenópole um fato inevitável (Doxiadis, 1974). Imaginou-a como uma rede hierarquicamente estruturada a partir de centros urbanos maiores e menores (Figura 5). Enquanto que os centros maiores corresponderiam às imensas regiões metropolitanas do presente – as megacidades –, com uma população de 5 a 10 milhões de habitantes, os centros de mais alta ordem alcançariam uma população de centenas de milhões – as megalópoles (ver Figura 6).

ACIDADE COMO FATO GEOLÓGICO GLOBAL: A EMERGÊNCIA DA TECNOURBESFERA Embora Doxiadis (1967, 1974) tenha avançado significativamente na construção de uma visão integrada do sistema urbano tanto em escala regional quanto nas suas conexões com os sistemas naturais, ele descreveu a ecumenópole preponderantemente em seu aspecto bidimensional, ou seja, como crescimento da área urbana resultante do aumento da população. Contudo, essa delgada crosta de rochas artificiais alastrada sobre o globo com a forma de uma rede pode ser descrita, do ponto de vista geológico, em três e em quatro dimensões. Além disso, ela pode ser considerada em termos da dinâmica de suas inter-conexões com os principais componentes dos sistemas planetários superficiais, quais sejam: a litosfera, a atmosfera, a hidrosfera e a biosfera.

Ou seja, no contexto dos sistemas da Terra, a cidade-múndi ou ecumenópole pode ser entendida como um fenômeno global e denominada de *tecnourbesfera*. Nessa

esfera tridimensional estão incluídos: a) o artefato urbano, ou sistema construído, formado predominantemente



Figura 5 – A área escura identifica a projeção da ecumenópole para o final do século XXI, como preconizado por Constantinos Doxiadis em 1961. A imagem da cidade-múndi atual (ver Figura 4), com 3,7 bilhões de habitantes, corresponderia a um estágio intermediário dessa projeção, prevista para 20 bilhões. O globo à esquerda, mostra a estrutura em rede da ecumenópole, onde as cidades ocupam diferentes hierarquias (ver Figura 6). [Fonte: Doxiadis, 1967.]

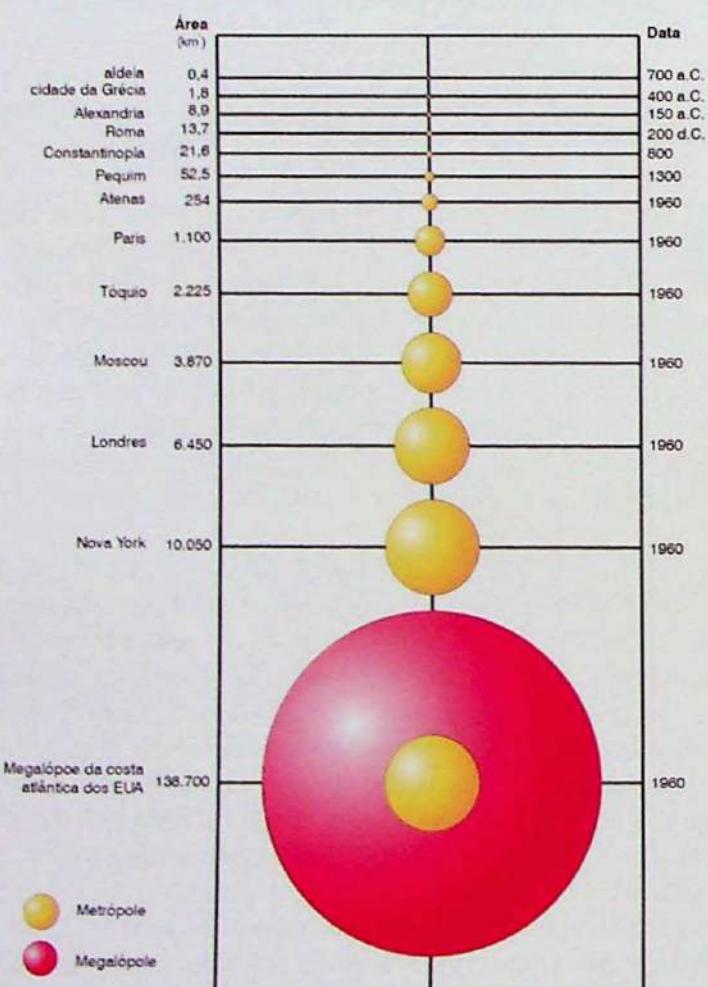


Figura 6 – Épocas de surgimento e exemplos de diferentes hierarquias de cidades, sendo da menor para a maior: aldeia, cidade, metrópole, megaciudadade, megalópole e ecumenópole (não representada). [Fonte: modificado de Doxiadis, 1967.]

de concreto (brita, areia e cimento), tijolos, ferro, vidro, cobre e asfalto; b) os dinâmicos eventos urbanos impulsionados por complexos sistemas tecno-industriais, químicos e eletrônicos, magnéticos e atômicos; c) as porções das esferas planetárias modificadas, assimiladas, metabolizadas e apropriadas pela cidade ao longo do tempo que, em escalas locais, comumente chamamos de domesticação da natureza (ver figuras 7 e 8).

A cidade não se “apóia” no substrato geológico da mesma forma que um livro se apóia sobre uma mesa: ela se engasta no subsolo, onde estabelece bordos de reatividade sólida, líquida e gasosa. Essa borda de interface entre a cidade e a litosfera passa a adquirir propriedades da cidade, como se fosse um crescimento autogênico. O túnel, por exemplo, não é da montanha, mas da via que une cidades. Da mesma forma, quando a cidade despeja seus esgotos na água dos rios, lagos e oceanos, ela passa a se enxertar nesses corpos d’água. A urbe necessita deles tanto para abastecer seus cidadãos e atividades, quanto para despejar suas sobras de alta reatividade. Esses corpos d’água alterados são, portanto, parte indissociável do meio urbano, com cheiros, cores e características que lhes são típicos.

Essas porções das esferas planetárias que se encontram na interface com a cidade apresentam-se intensamente transformadas pelos processos que dão suporte físico à cidade-múndi e que abastecem os seus moradores. Tais processos incluem tanto a extração de recursos minerais, hídricos, aélicos e bióticos quanto o lançamento no meio ambiente de toda uma sorte de resíduos sólidos, líquidos e gasosos, tóxicos e inertes. Esses resíduos são expelidos incessantemente pelos processos metabólicos urbanos

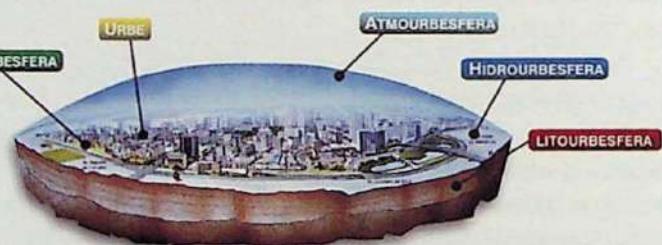


Figura 7 – Modelo tridimensional da tecnourbesfera na escala da cidade, identificando as porções de cada esfera planetária por ela modificada.

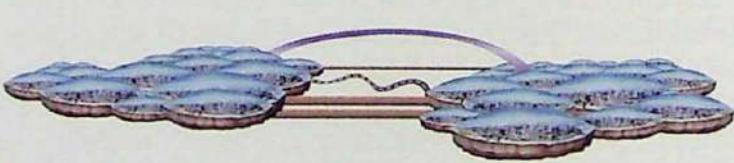


Figura 8 – Modelo tridimensional idealizado de parte da tecnourbesfera na escala de megalópole. As megaciudades conectam-se entre si por inúmeros artefatos que estão engastados nas esferas planetárias, como túneis, tubulações, rodovias, ferrovias, hidrovias e aerovias. O sistema físico urbano global inclui as porções das esferas planetárias modificadas, constituindo a tecnourbesfera.

(Girardet, 1992), vindo a formar expressivos depósitos de materiais sólidos e plumas líquidas e gasosas. Na escala local, tais resíduos e processos parecem estar fora do campo de preocupações cotidianas dos habitantes urbanos. Porém, muitos autores vêm definindo a ação humana na natureza como sendo geológica, dada a magnitude desses depósitos e da transformação causada pelo metabolismo urbano (e.g., Fyfe, 1991; Goudie, 2000).

Assim, parte do solo e subsolo da litosfera encontra-se modificada pela ecumenópole, originando uma *litourbesfera* (Figura 7), cuja espessura pode alcançar, em alguns locais, até 10 km (que é a profundidade de certas sondagens de prospecção geológica). A evolução das cidades acompanha *pari passu* o desenvolvimento da mineração. Quanto maior o crescimento urbano, maior a produção mineral (Chew, 2001). Na era das megacidades, a litosfera é perfurada em níveis cada vez mais profundos, seja para a extração de recursos minerais e energéticos (como carvão, petróleo e gás), seja para construir túneis, sistemas de suporte à infra-estrutura urbana e descarte de materiais por meio de depósitos tecnogênicos (Peloggia, 1998; Carvalho, 1999).

Da mesma forma, as águas superficiais e subterrâneas transformadas pelo uso doméstico, comercial e industrial da cidade constituem a *hidrourbesfera* (Figura 7). As águas do mar do Norte e do Báltico na costa setentrional da Europa, por exemplo, encontram-se tão severamente poluídas (National Geographic, 1992; Goudie, A., 2000) que não podem ser vistas como pertencentes à hidrosfera natural, mas sim como borá líquida da porção europeia da cidade-múndi.

De modo análogo, o ar modificado pelas emissões domésticas, veiculares e industriais urbanas constitui a *atmourbesfera* (Figura 7). A área afetada pela chuva ácida decorrente da contaminação do ar pelas cidades do leste dos EUA se estende até a região do Mississippi (Goudie, 2000). No Brasil, essa área se estende desde as cidades do Rio de Janeiro e São Paulo até o Pantanal (National Geographic Atlas, 1992). O crescimento da atmourbesfera (ou da atmosfera modificada) tem sido um tema cada vez mais preocupante, devido aos rios de gases de efeito estufa emitidos pelas atividades da cidade-múndi. O aquecimento global é um dos sintomas das apropriações da atmosfera feitas pela cidade. Nesse sentido, ele não é a doença principal, mas sim o metabolismo urbano que emite os gases de efeito-estufa.

Por fim, a modificação intensa da biota origina a *biourbesfera* (Figura 7), onde a agricultura intensiva químico-mecânica e a perda da biodiversidade são algumas de suas formas. Por ser uma formidável fonte de recursos para dar suporte à vida humana (Williams, 2002), o esgotamento da biosfera, como evidenciam os mapas da distribuição das florestas naturais nos Estados Unidos da América entre 1620 e 1920 (Figura 9), tem sido um dos primeiros a receber a atenção da sociedade. Thomas Malthus, em 1798, tratou essa possibilidade da extenuação como crise de abastecimento alimentar, quando comparou o crescimento geométrico da população com o mero crescimento aritmético da produção agrícola. Mas o problema da destruição da biosfera ganhou dimensões mais amplas, com os trabalhos pioneiros de Jean Dorst, que escreveu em

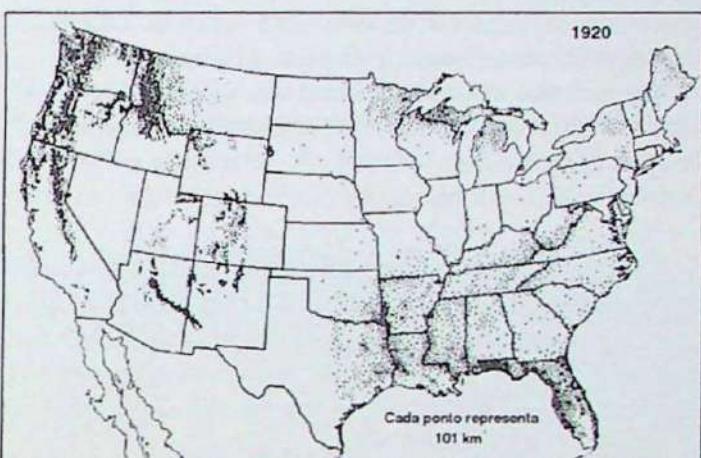


Figura 9 - Distribuição das florestas naturais nos Estados Unidos da América em 1620 e 1920. Trezentos anos depois, dos 170 milhões de hectares florestados em 1620, restaram cerca de 10 milhões. [Fonte: Williams, 1992.]

1971 o livro *Antes que a Natureza Morra* (Dorst, 1973), e de Donella Meadows e Dennis Meadows, editores do livro *The limits to growth* (Meadows & Meadows, 1972). Porém, a visão mais global da relação da biosfera com as ações humanas e demais sistemas da Terra foi oferecida pela Teoria de Gaia de James Lovelock (1979), que estabeleceu a idéia de que a biosfera é um sistema interdependente dos demais.

A tecnourbesfera é um componente da biosfera com grande capacidade de transformação e destruição. No perfil da Figura 10, mostram-se esquematicamente as esferas do sistema Terra e o lugar ocupado pela tecnourbesfera. Na era das gigantescas cidades, já não se coloca mais a questão clássica da história natural inaugurada pelos sábios gregos de inquirir o lugar da humanidade na natureza. Trata-se agora de investigar o lugar da tecnourbesfera no sistema Terra para sabermos o lugar da humanidade na cidade.

Os novos desafios da Geologia Urbana: entender a cidade como fato geológico global Independentemente de sua escala, toda cidade e assentamento humano é um fato geológico. As antigas cidades da Mesopotâmia, como a cidade de Ur nas margens do rio Eufrates, eram construídas com adobes de argila. Além de proteger seus habitantes contra ataques de outros grupos humanos, a construção urbana era projetada para enfrentar a fúria das inundações

do Eufrates. Por meio de tentativas e erros, os construtores dessa cidade aprenderam as primeiras lições geológicas sobre a sazonalidade dos ciclos fluviais, materiais de construção e técnicas de contenção e controle de inundações.

Tanto os materiais de construção como a escolha do local para erguer uma cidade exigem o melhor do conhecimento humano e da perícia técnica. Na construção de uma cidade, não está em jogo apenas a beleza das edificações ou a proteção da vida de uma única geração de habitantes. O que se coloca é a possibilidade de uma cultura atravessar a densidade do tempo e dos processos geológicos, ou seja, ser sustentável. Por isso, as cidades são também um mecanismo humano de permanência de sua cultura, capaz de lançar sondas profundas nos sistemas naturais, de modo a melhor entendê-los e modificá-los e, assim, estabelecer estratégias mais adequadas de sobrevivência.

Nas cidades contemporâneas em que as paredes são todas homogeneizadas com argamassa e pinturas, os cidadãos perderam a possibilidade de relacionar os materiais construtivos com a paisagem circundante. Além disso, os materiais de construção são transportados para o sítio urbano desde lugares longínquos, cujas paisagens são desconhecidas pelos citadinos. As cidades parecem ser resultado de procedimentos automáticos de construção, cujos materiais provêm de uma fonte inesgotável que se situa em algum lugar distante e independente da ventura dos ciclos naturais.

Mas não apenas os materiais se apresentam como se fossem inesgotáveis. O próprio espaço em que as cidades se estabeleceram parece ter propriedades elásticas e capacidade de abrigar indefinidamente o crescimento urbano. Essa ilusão é, em parte, proporcionada pela idéia de cidade como sendo um tabuleiro geométrico que permite sua expansão em todas as direções sem que haja perda funcional. As cidades se expandem como se conseguissem manter a simetria do tabuleiro que lhes deu origem e como se não houvesse obstáculos naturais para deter seu avanço (ver Figura 11). Como nos ensinou o influente filósofo Michel Serres, idealizamos geometricamente o mundo e o nosso habitat e, “a partir de então, habitamos neste espaço como se fosse uma casa, ou ainda melhor, como se fosse a nossa terra: o metro é a Terra, e é este o sentido profundo do vocabulário *geometria*” (Serres, 1997, p. 290).

As perigosas bordas da tecnourbesfera: quando a cidade alcança a falda de um vulcão – o exemplo de Arequipa

A cegueira causada por essa perda da relação entre a paisagem e a construção urbana, cada vez mais entendida apenas como uma estética geométrica, tem empurrado os limites urbanos para lugares muito distantes do pequeno e doméstico núcleo fundador ancestral. A cidade foi perdendo rapidamente a consciência de sua própria dimensão e dos novos lugares por onde foi se esparramando, sendo, por vezes, muito inóspitos e chamados de periferia. Essa periferia não é apenas social e urbana, mas é a forma possível que grupos humanos desenvolvem de morar no bordo da tecnourbesfera. O estudo da professora Elizete Menegat (2003) mostrou que há aí uma perda da forma e conteúdo urbanos como vinham sendo definidos no Ocidente.



Figura 10 – Perfil dos principais componentes dos sistemas superficiais da Terra, onde a tecnourbesfera está evidenciada em amarelo. (Modificado de Menegat et al., 2006.)

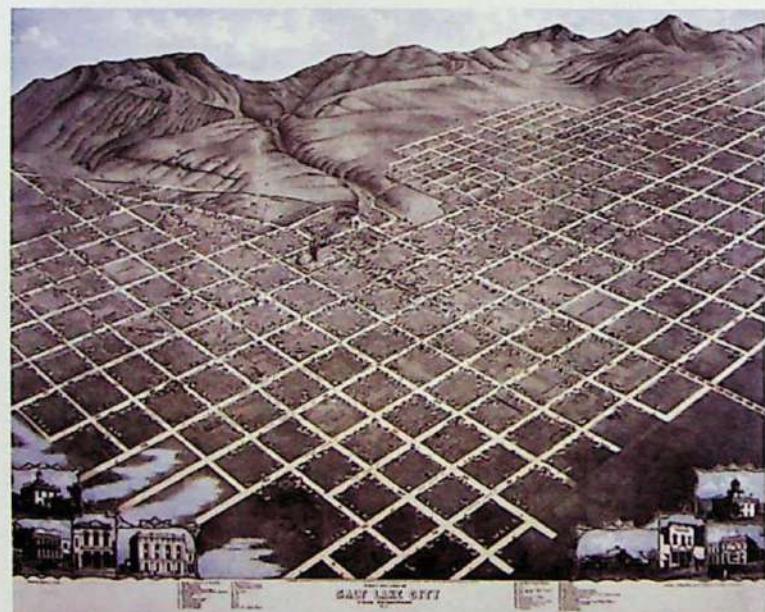


Figura 11 – Vista olho de pôr do sol de Salt Lake City (Utah, EUA), de 1870, feita por Augustus Koch. A trama urbana perfeitamente ortogonal infunde uma lógica de infinitude e a ilusão de que a cidade não teria limites para se expandir. (Fonte: Reps, 1998, p. 97.)

Uma situação singular em relação a sua borda vive a cidade de Arequipa, localizada nos contrafortes orientais dos Andes no sul do Peru. O núcleo urbano histórico, assentado em um oásis do vale do rio Chili, possui uma perfeita geometria em xadrez (ver Figura 12). Os prédios foram construídos com blocos de rochas vulcânicas brancas, chamados de *sillar*, originadas pelas antigas extrusões de três vulcões hoje adormecidos que se encontram no entorno (Misti, Pichu Pichu e Chachani). O centro histórico de Arequipa, que tem o epíteto de *Ciudad Blanca*, é um dos mais imponentes da América do Sul e é reconhecido como patrimônio cultural da humanidade pela Unesco (Figura 13).

Quando essa relíquia arquitetônica começou a ser construída, em 1540, a pequena vila não abrigava sequer 200 habitantes. Nessa época, caso houvesse uma extrusão vulcânica, a evacuação da vila seria um procedimento razoável de ser colocado em prática. A segurança dos cidadãos contra riscos geológicos poder-se-ia fazer a partir de procedimentos usuais para cidades próximas a apertos vulcânicos ativos.

Em 1940, a cidade contava com mais de trinta mil habitantes e, de lá para cá, a população cresceu para cerca de novecentos mil habitantes (MPA, Atlas Ambiental de Arequipa, 2001). Todos esses cidadãos que se incorporaram à cidade são muito orgulhosos da beleza arquitetônica e da paisagem vulcânica local. Mas, não se deram conta da nova condição da imensa Arequipa atual, cujos limites já não podem mais ser vistos a partir dos terraços dos prédios mais elevados. A borda de Arequipa se alastrou a perder de vista em direção às encostas mais altas do vale, justamente onde se situam as faldas do vulcão Misti, como mostra a Figura 14.

Embora o Misti encontra-se adormecido, ele faz parte de uma região vulcânogênica e sísmica muito ativa. Assim, há riscos de avalanches produzidas por terremotos e de expressivos fluxos torrenciais devido a chuvas intensas (*torrenteras*). O problema de Arequipa foi, assim, duplicado: além dos riscos geológicos, agora há também o problema da evacuação de uma cidade tão numerosa e sem planos e infra-estrutura para procedimentos dessa envergadura, pois não existem vias de rápido escoamento. A cidade parece, assim, aprisionar seus habitantes e estes, já não se dão conta dos riscos do ambiente circundante. A situação é como se a cidade tivesse crescido apenas olhando para seu centro, sem considerar os possíveis riscos geológicos do entorno que, no início da construção da cidade, pareciam estar muito distantes.

A situação de Arequipa é apenas mais didática do que outras que tenho estudado. De um modo geral, todas as cidades que cresceram muito no último período encontram-se em situações análogas. Porto Alegre, por exemplo, tem no lago Guaíba sua única fonte para abastecimento de água. Porém, nas margens desse lago também está instalado um potente parque de indústrias (petroquímica, celulose, refino de petróleo, curtume, metal-mecânica, alimento, fertilizante, etc.) com altíssimo potencial de contaminação das águas. Caso viesse a ocorrer um acidente industrial que atingisse as águas do lago Guaíba, como aquele que, em 2006, ocasionou a mortandade de cerca de 100 toneladas de peixes no rio dos Sinos, seu afluente, a cidade seria jogada no caos urbano.

O crescimento da ecumenópole leva-a a ocupar terrenos de risco geológico crescente. Suas bordas vão sendo empurradas ladeira acima em encostas de vulcões ou em locais propensos a movimentos de massa, ou para as margens de rios e lagos com riscos de inundação. Seus dejetos, rejeitos e resíduos, cada vez mais massivos e tóxicos, infestam toda a região onde ela se localiza. Diferentemente da cidade de Ur, a cidade-múndi já não consegue mais proteger adequadamente seus cidadãos dos eventos naturais e também daqueles que, embora possuam essa escala, foram produzidos como consequência da atividade



Figura 12 – O Centro Histórico de Arequipa, tombado como patrimônio cultural da humanidade, planejado como um perfeito tabuleiro. O quadrado cinza-escuro, no centro da imagem, identifica a Plaza de Armas. (Foto: MPA, Atlas Ambiental de Arequipa, 2000).



Figura 13 – Prédios históricos na Plaza de Armas de Arequipa, construídos com blocos de rochas vulcânicas brancas. (Foto: MPA, Atlas Ambiental de Arequipa, 2000).

humana. A pesquisadora estadunidense Janet Abramovitz (2001) chama esses eventos de “desastres desnaturais” (*unnatural disasters*), incluindo aí furacões e inundações que decorrem do aquecimento global.

A complexidade da tecnourbesfera e o problema da cultura dos cidadãos A cidade-múndi não dispõe a seus cidadãos representações adequadas para que possam ver a dimensão e a complexidade da tecnourbesfera. Seria como, em geologia, ver apenas os vários tipos de rochas e processos de modo fragmentado, sem localizá-los nos eventos da tectônica de placas.

A tecnourbesfera se coloca como um supra-organismo em uma escala extra-humana. Apenas conseguimos diagnosticá-la com avançados aparatos tecnológicos e a leitura que fazemos dela ainda é incipiente. De sorte que, quando vemos a cidade na escala da tecnourbesfera, não há solução para vermos os seres humanos e, vice-versa. A tecnour-

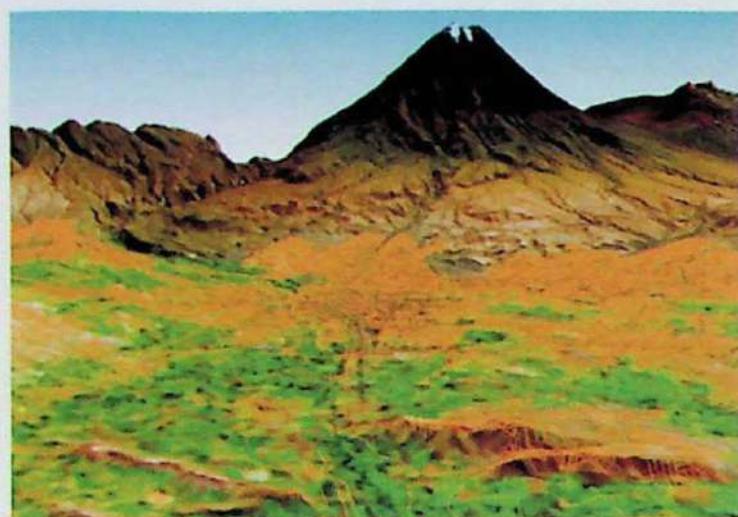


Figura 14 – Modelo digital do terreno da cidade de Arequipa, Peru. A cor laranja identifica a área com ocupação urbana em 1997, cuja borda avança sobre a encosta do imponente vulcão Misti (5.825 m), no centro da imagem. (Fonte: MPA, Atlas Ambiental de Arequipa, 2000).

besfere se manifesta localmente como desastres sociais e ambientais que envolvem cada vez um número maior de pessoas, o que leva os cidadãos a terem medo crescente da natureza e da própria cidade. Esses fatores aumentam a desordem social e desencadeiam estratégias de sobrevivência que remetem ao estado natural do homem, ou seja, de violência e barbárie crescentes (Menegat, 2006).

Pode-se fazer uma analogia do abismo existente entre a cidade que os cidadãos pensam habitar e a complexidade da cidade-múndi – onde de fato habitamos – com a geometria fractal das seções de um ramo de brócolis. A seção da base do ramo é uma e circular (ver Figura 15). Na posição intermediária, onde o ramo se bifurca, a seção apresenta dois a três círculos. Porém, no topo, há uma multiplicidade de ramificações, sendo a seção composta por inúmeros círculos pequenos.

Grande parte da população das grandes cidades pensa habitar a ainda pequena cidade doméstica onde seus pais e avós moravam. Esse estágio corresponderia à seção circular simples da base do ramo do brócolis. Porém, de fato, a megaciadade é um sistema de grande complexidade, com geometria fractal (Batty & Longley, 1994) e dinamicidade que atua na escala planetária. Esse estágio corresponde à seção do topo do ramo do brócolis, onde há uma multiplicidade de pequenos círculos. O tempo entre os estágios das seções 1 e 4 das ramificações do brócolis corresponderia, no Brasil, a: 1) cidades no inicio do século XX; 2) cidades metropolitanas da década de 1940; 3) conurbações da explosão urbana da década de 1970; 4) megaciadades de 2007. Ou seja, grande parte dos habitantes das megaciadades com idade superior a 30 anos possui uma cultura herdada de seus pais e avós, que viviam em uma situação representada pelos estágios 1 e 2. O abismo cultural se agrava para o futuro: os filhos e netos dos habitantes atuais das megaciadades com idade superior a 30 anos irão viver em um mundo com 9 bilhões de habitantes, sendo 6 bilhões urbanos.

Os desafios da Geologia Urbana para o próximo período

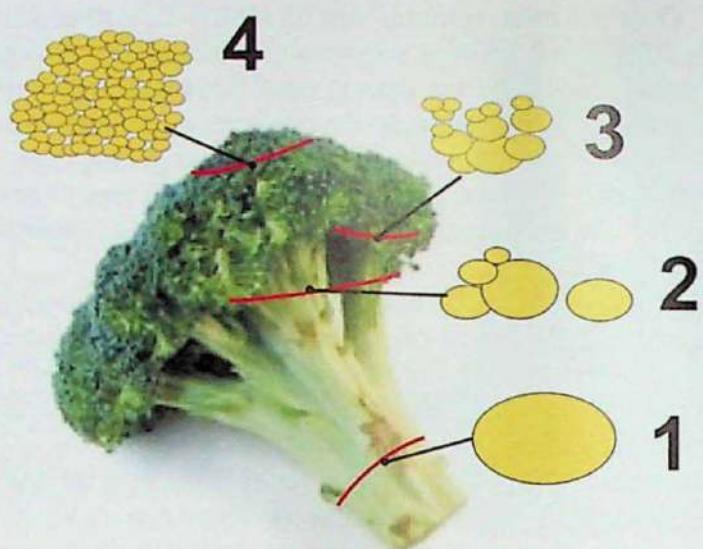


Figura 15 – As ordens de complexidade das secções do brócolis são análogas ao crescimento da urbanização. Na base do ramo, há uma única seção circular e, no topo, uma multiplicidade de círculos coalescentes. A seção circular simples é análoga à cidade pequena a média que geralmente corresponde àquela onde os cidadãos pensam estar habitando. Já a seção com múltiplos círculos corresponderia à complexidade da cidade-múndi, onde os cidadãos realmente habitam, mas não podem enxergá-la por não possuirem conceitos adequados para entender um supra-organismo em uma escala geológica.

do são imensos e, talvez, esse venha a ser um dos campos de maior absorção de profissionais. A demanda por materiais para a construção das cidades não só tenderá a crescer, bem como novas perspectivas se abrem com a busca de recursos que possibilitem menor impacto ambiental na sua extração e melhor conforto ambiental da construção, diminuindo os gastos energéticos (Hough, 1984, Sattler, 2004). A hidrologia das cidades coloca-se como questão emblemática. Por um lado, há aumento da demanda por água, por outro, os mananciais próximos das cidades estão cada vez mais poluídos. Além disso, a urbanização tem impactos significativos no ciclo hidrológico, seja aumentado o escoamento superficial seja aumentando a freqüência e magnitude das enchentes (Tucci, 2006).

Porém, os maiores desafios estarão colocados na geração de conhecimentos que descrevam a tecnourbesfera e ajudem a planejá-la e projetá-la de modo a diminuir sua pegada ecológica (Wackernagel & Rees, 1996), quer dizer o impacto sobre as demais esferas planetárias. Para tanto, a produção de informação sobre a geopolisagem urbana acessível simultaneamente aos gestores, técnicos, cientistas, legisladores, juízes, empreendedores, escolares e cidadãos coloca-se como fundamental para construir uma cultura urbana capaz de apreender a complexidade atual e transmiti-la para os descendentes.

INFORMAÇÕES PARA A SUSTENTABILIDADE URBANA E O ENTENDIMENTO DA TECNOURBESFERA: O EXEMPLO DO ATLAS AMBIENTAL DE PORTO ALEGRE A cidade de Porto Alegre, situada nas margens do Lago Guaíba na região sul do Brasil,

possui uma população de cerca de um milhão e quatrocentos mil habitantes. A qualidade de vida nesse município pode ser avaliada por diversos indicadores sócio-ambientais (ver Menegat, 2002a, 2002b): (a) o saneamento básico e a água potável atingem, respectivamente, mais de 79% e 98% da população; (b) as vias públicas possuem mais de um milhão de árvores, sendo a capital mais arborizada do país; (c) o índice de área verde é de 14,95 m²/habitante; (d) a população participa dos destinos da cidade através do Orçamento Participativo.

Em 1998, foi publicado o *Atlas Ambiental de Porto Alegre* (Figura 16) como resultado de um convênio entre a Universidade Federal do Rio Grande do Sul – por meio do Instituto de Geociências - da Prefeitura Municipal de Porto Alegre – por meio da Secretaria Municipal do Meio Ambiente – e do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Essa obra apresenta a história natural de Porto Alegre desde 800 milhões de anos atrás (data das rochas mais antigas) até o tempo presente em que ocorre a intrincada mistura de gases na atmosfera devido à emissão veicular.

O *Atlas*, além de apresentar uma grande quantidade de dados, soberbamente documentados, sobre os parâmetros ambientais do município, sintetizou-os dentro das melhores técnicas interdisciplinares. Tendo como matriz do conhecimento básico a Geologia (Menegat *et al.*, 1998), foi possível estabelecer uma História Natural da paisagem, como preconizaram os naturalistas do século XIX, mas fazendo uso das tecnologias, das teorias e da cosmovisão atual.

Os assuntos foram organizados em três seções: o *Sistema Natural*, com oito capítulos sobre a geologia, geo-

morfologia, hidrografia, solos, vegetação, fauna, clima e unidades de conservação; o *Sistema Construído*, com 9 capítulos que apresentam a evolução urbana, o modelo espacial urbano, a evolução das áreas verdes, a arborização das vias públicas, o clima urbano, as atividades que produzem impacto ambiental e os serviços de saneamento que mitigam o impacto. Por fim, a *Gestão Ambiental*, onde três capítulos apresentam os principais conceitos e problemas da gestão ambiental num mundo urbanizado, da gestão ambiental pública e dos dados de Porto Alegre.

Uma representação geológica da cidade e seu ambiente: as diversas escalas de tempo e espaço

O *Atlas Ambiental de Porto Alegre* utilizou-se das técnicas geológicas de entendimento e representação da realidade. Além de mapas temáticos (bidimensional), e blocos-diagramas (tridimensional), foram elaboradas ilustrações em várias progressões escalares da parte para o todo, do regional ao planetário, e do tempo presente para o passado geológico (ver Figura 17). Diversos blocos-diagramas representam a evolução temporal em escalas que vão desde a do tempo geológico – que trata de eventos que ocorreram há 800 milhões de anos atrás – até a do tempo das horas, meses e anos – que apresenta as séries temporais de eventos, como a da progressão de uma frente fria no inverno.

O uso de modernas tecnologias de representação da subsuperfície e da paisagem permitiu que os dados e suas interpretações fossem apresentados em 98 mapas temáticos, os quais foram elaborados em diferentes escalas e integrados por programas computadorizados de geoprocessamento. Acompanham os mapas ilustrações de modelos tridimensionais (blocos-diagramas) e cenários feitos com base na integração de dados científicos, além de 611 fotografias. O plano de tomadas fotográficas incluiu diversas escalas, desde aquela possível em vôos com aeroplano e helicóptero, até o uso de guias em avenidas e ruas da cidade e, por fim, do microscópio em laboratórios. A precisão da linguagem técnica aliada a essas ilustrações tornou a obra simultaneamente acessível ao público não especializado e aos técnicos das mais distintas áreas, pro-

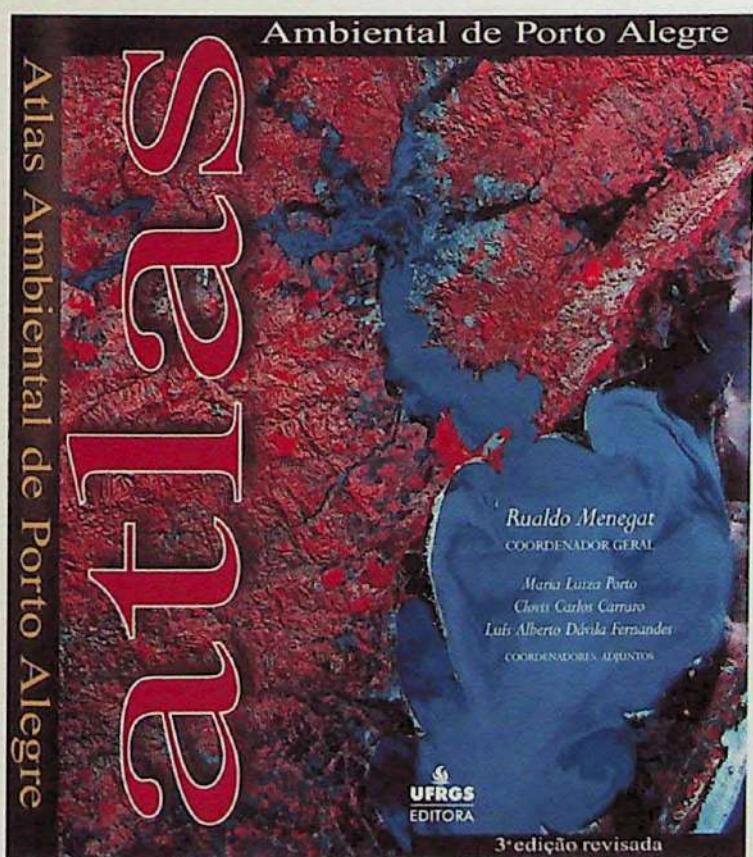


Figura 16 – Capa do *Atlas Ambiental de Porto Alegre*, publicado em 1998, depois de quatro anos e nove meses de trabalho de uma equipe com mais de duzentos técnicos e pesquisadores.



Figura 17 – Esquema do *Atlas Ambiental de Porto Alegre* evidenciando a relação entre escalas locais e globais para a explicação dos eventos e registros representados pelos mapas temáticos do município. A ilustração por meio de blocos-diagramas é acompanhada de fotografias. [Fonte: Menegat *et al.*, 2006].

movendo o entendimento interdisciplinar e sistêmico dos assuntos tratados.

Assim, o *Atlas* proporcionou alguns avanços técnicos, científicos e institucionais reunidos em quatro perspectivas: (a) dos saberes; (b) da representação das cidades e seu ambiente; (c) das instituições; (d) da gestão ambiental e urbana, da participação dos cidadãos e da educação.

Atualmente, cerca de 50 cidades elaboraram seus próprios atlas tendo o de Porto Alegre como referência, entre as quais:

- a) No Brasil: Recife (PMR, 1999), Joinville (FATMA, 2002) São Paulo (Sepe & Takia, 2004), Araraquara (PMA, 2004), Brasília (DF, 2006), Salvador (PMS, 2006), Londrina (Barros *et al.*, 2007);
- b) Em outros países da América do Sul: Buenos Aires (Nabel & Kullock, 2006), Lima (MPL, 2008), Trujillo (MPT, 2002) e Arequipa (MPA, 2001)
- c) Na América Central: Porto Rico (Marrero & Colon, 2006).
- d) Na Europa: Viena e Barcelona (ICM, 1999; Acebillo & Folch, 2000);

A gestão ambiental urbana, a participação dos cidadãos e a educação ambiental: caminhos para domesticar a tecnourbesfera O *Atlas* proporcionou o acesso à análise e cruzamento de diferentes parâmetros mapeados, tornando o diagnóstico de acidentes e problemas ambientais mais preciso. Além disso, a análise macro-ambiental a partir dos mapas temáticos possibilita que os inúmeros processos de fiscalização e legislação ambiental do município possam ser enquadrados dentro de cenários e prognósticos construídos com base científica. Da mesma forma, as áreas de grande interesse ambiental ficam evidenciadas em termos analíticos e descritivos, aprimorando as formas de manejo, conservação e preservação das mesmas. Evita-se, assim, o eco-ideologismo que, muitas vezes, serve de base para o enfoque dos temas ambientais. De forma apropriada, também, contorna-se o urbano-ideologismo, o qual muitas vezes se abstém da análise sobre a importância real das questões ambientais na qualidade de vida nos meios urbanos.

Com o *Atlas*, os cidadãos passam a ter o seu melhor instrumento para a gestão ambiental: o conhecimento (ver Figura 18). Com ele, os cidadãos ganham confiança na sua capacidade de gerir o entorno, indo muito além dos receituários que, às vezes, não se aplicam para a realidade imediata em que vive. A educação ambiental pode ser desenvolvida em cada sala de aula com o uso de informações locais (Menegat, 2000).

Há um redobrado êxito nesta perspectiva. Primeiro, na motivação do aluno, que sempre se interessa mais quando o objeto do aprender parte da sua vivência. Segundo, que, ao compreender a sua realidade, desde cedo o aluno se capacita para o exercício consciente da cidadania a partir de pressupostos ambientais mais bem contextuali-

zados. Assim, a educação ambiental abrange fatores que precisam ser definidos em âmbitos mais amplos do que aqueles que costumeiramente são realizados. Há a necessidade do tratamento interdisciplinar do problema – onde o conhecimento geológico se coloca como fundamental – e da aglutinação de várias instituições, de sorte a concentrar esforços e prognosticar adequadamente objetivos e resultados. Projetos desse tipo vêm sendo desenvolvidos na instalação de Laboratórios de Inteligência do Ambiente Urbano (Figura 19), como o que ocorre na Escola Municipal de Ensino Fundamental Judith Macedo de Araújo, em Porto Alegre.

As esferas de decisão sobre os destinos da cidade ganham um instrumento para a compreensão ampla da realidade em que atuam. O Orçamento Participativo, uma

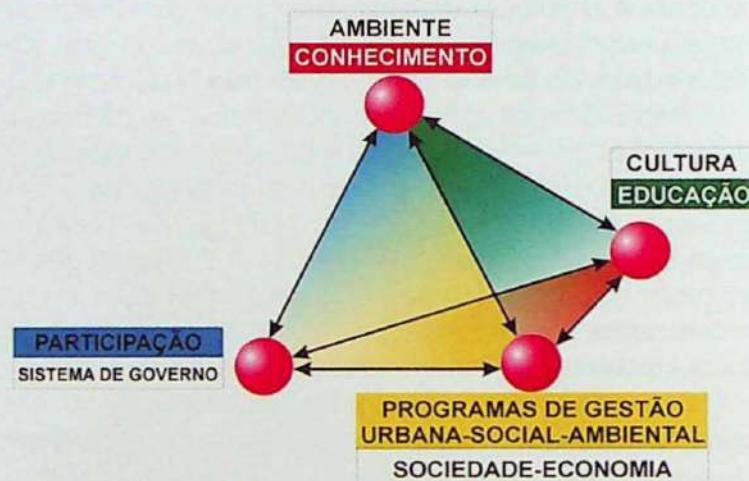


Figura 18 – Tetraedro da educação ambiental urbana integrada, mostrando as relações biunívocas entre quatro esferas que devem ser consideradas: do conhecimento local do ambiente urbano, da educação e formação cultural dos cidadãos; dos programas de gestão sócio-ambiental urbana, e do sistema de governo e formas de gestão. [Modificado de Menegat, 2000.]

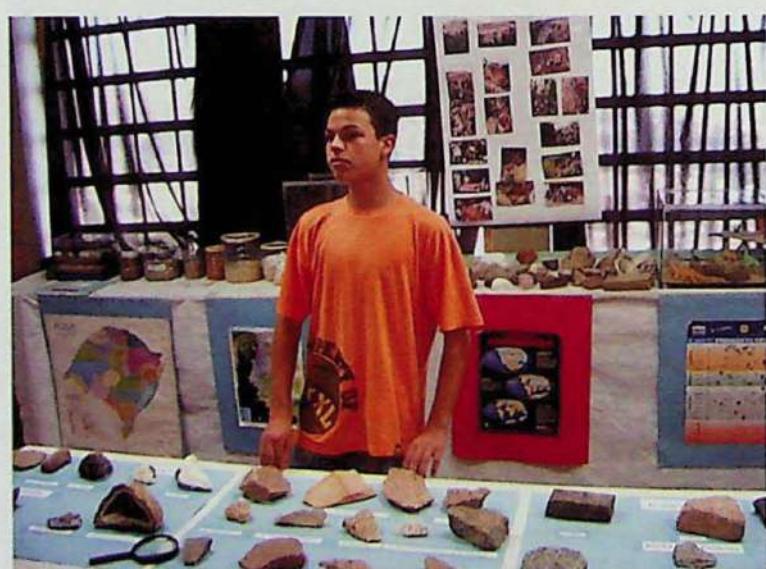


Figura 19 – Laboratório de Inteligência do Ambiente Urbano, em escola municipal de Porto Alegre. No primeiro plano, a litooteca montada pelos alunos e professores da escola com apoio de estudantes do curso de geologia da Ufrrgs.

incontestável marca de Porto Alegre, poderá se enriquecer na medida em que seus protagonistas possam dispor de representações da realidade urbana para além do imediatismo das demandas colocadas. Com o *Atlas*, técnicos, escolares, professores, gestores, governantes, empresários, organizações não-governamentais, e os cidadãos podem estabelecer referenciais conceituais comuns, melhorando a lógica e a eficiência das soluções práticas para os problemas que enfrentam (Figura 18). Os programas de gestão ambiental podem ser entendidos em todos os recortes da vida social e urbana, saindo do hermetismo das esferas eminentemente tecnocráticas ou dos círculos eminentemente ambientalistas ou, ainda, acadêmicos.

CONSIDERAÇÕES FINAIS A geologia tem a oferecer grandes contribuições para a solução de problemas urbanos, que não se resumem apenas à clássica oferta de bens minerais e recursos energéticos. Há uma série de questões relacionadas à gestão ambiental, como a destinação adequada de resíduos sólidos, líquidos e gasosos que vem recebendo atenção crescente de profissionais e pesquisadores das ciências da Terra. O seqüestro de carbono, como medida de mitigação do impacto das emissões de CO₂ no aquecimento global, é uma delas. Ou, a busca por novas fontes de abastecimento d'água, controle da poluição de aquíferos, estudos de geomorfologia urbana são outras frentes importantes de trabalho. Todas elas ajudam a entender os efeitos da urbanização e a diminuir a pegada ecológica.

Porém, há três aspectos cuja demanda pelo conhecimento geológico deve crescer sobremaneira no próximo período. O primeiro deles refere-se ao planejamento urbano e redução de riscos ambientais e geológicos. O esparrame urbano, principalmente o espontâneo, empurra as cidades para sítios inóspitos e de alto risco geológico e ambiental. Além do uso de técnicas canônicas para diminuir os riscos, faz-se necessário estabelecer planos estratégicos de emergência ambiental, principalmente nas megalópoles. No caso brasileiro, os grandes aglomerados urbanos não dispõem de mecanismos de controle e gestão unificados. Cada município cuida apenas de “sua parte” e os órgãos de controle metropolitano não dispõem de mecanismos suficientes para contribuir com estratégias eficazes em situações de emergência.

O segundo desafio é o de contribuir com o dimensionamento da tecnourbesfera, fazendo uso das técnicas geológicas de modelagem de terrenos em escalas regionais e em séries temporais de médio e longo prazo. As megalópoles e megacidades são, em geral, dimensionadas fisicamente apenas quanto ao tamanho de sua área, população, densidade e altura das edificações. Embora técnicas de medição da pegada ecológica tenham trazido grandes avanços no dimensionamento do consumo e descarte urbanos, é preciso dimensionar geologicamente as interfaces da cidade-múndi com as demais esferas planetárias.

O terceiro aspecto diz respeito ao entendimento do lugar da humanidade na natureza. Faz-se necessário desenvolver representações das cidades a partir de levantamentos temáticos, fotografias e ilustrações tridimensionais e tetradimensionais que sejam adequadas para a avaliação

interdisciplinar de problemas urbanos e para a educação formal e não-formal.

O conhecimento da Terra sempre foi parte indissociável do progresso humano (Menegat, 2008). No Renascimento, quando houve a descoberta do Novo Mundo, a cartografia dos continentes e mares conferiu uma nova visão da Terra, que fez avançar as teorias científicas sobre o mundo em que vivemos. Não por acaso, data dessa época a mudança sofrida na imagem do mitológico *Atlas*. Em vez de suportar o globo celeste, como preconizado pelos antigos gregos, os renascentistas passaram a representá-lo carregando nas costas o globo terrestre (Figura 20). Isto é, houve a descoberta de que há um mundo terreno e próximo para ser suportado e que cada habitante tem um limite para fazê-lo, que chamamos de humano. Para fazer frente ao mundo urbanizado da tecnourbesfera, devemos, mais uma vez, mudar a representação do mitológico *Atlas*. Se quisermos que a Terra seja capaz de abrigar a biosfera, precisamos, antes, tornar as cidades mais sustentáveis. Assim, em uma visão mais contemporânea, o mitológico *Atlas* deveria estar carregando em seus ombros um edifício, símbolo da tecnourbesfera e das nossas preocupações primeiras para diminuir o fardo do mundo (Figura 21).

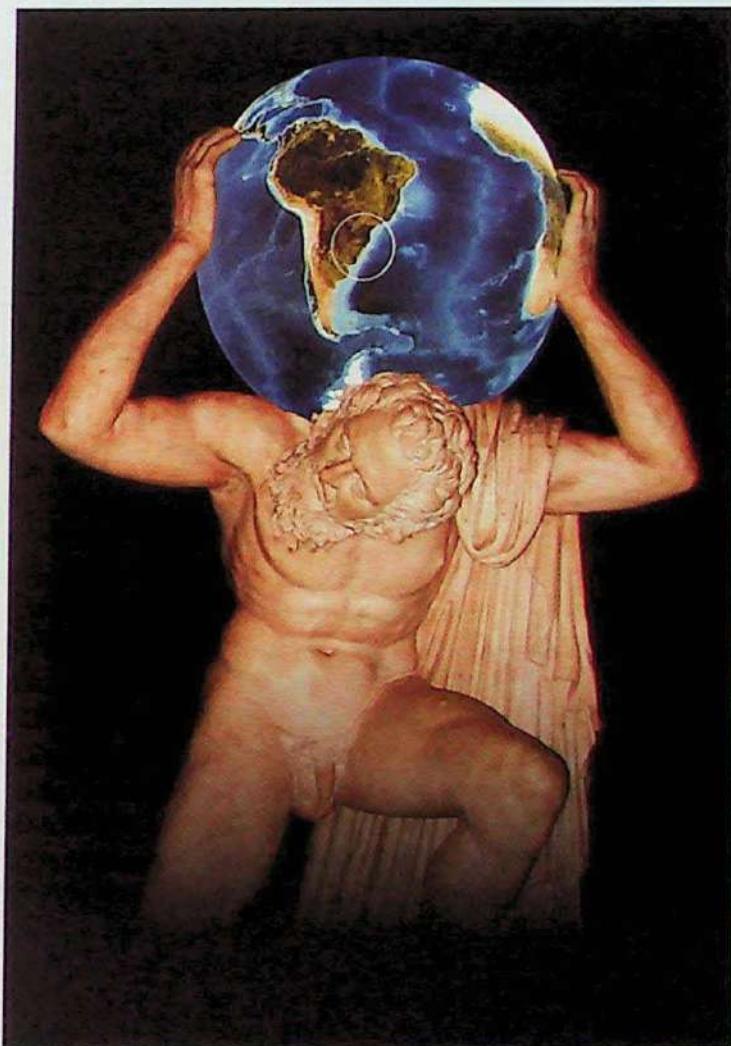


Figura 20 – *Atlas* de Farnese esculpido pelos romanos no século VIII d.C. Os renascentistas substituíram o globo celeste pelo terrestre. Na imagem acima, foi inserida uma projeção esférica do mapa verdadeiro da Terra, obtido por uma composição de imagens de satélite. [Fonte: Menegat, 2008.]

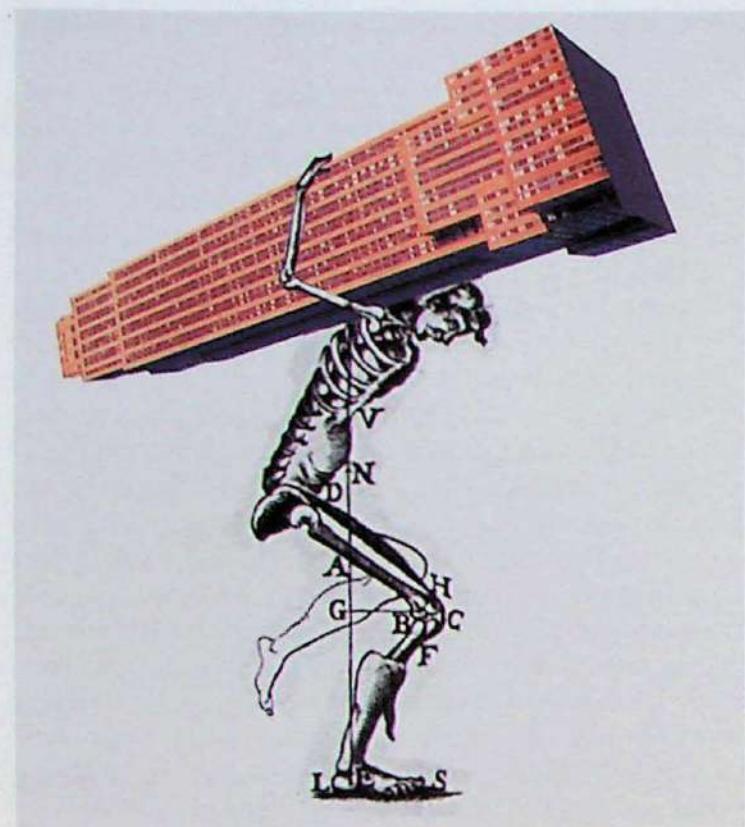


Figura 21 – Representação do *Atlas do século XXI*. O globo foi substituído por um imenso edifício, representando a tecnourbesfera, e, no lugar do deus mitológico, foi colocada uma figura humana exibindo seu frágil esqueleto. Essa figura foi desenhada por Giovanni Alphonsi Borelli [1608-1681] e publicada em sua obra-prima *De Motu Animalium*, onde estabeleceu os princípios da biomecânica.

Referências

- Abramovitz J. 2001. *Unnatural Disasters*. Worldwatch Institute, Washington, 62 pp.
- Acibillo J. & Folch R. 2000. *Atlas Ambiental de l'àrea de Barcelona; balanç de recursos i problemes*. Editorial Ariel, Barcelona, 439 pp.
- Barros M.V.F., Archela, R.S., Barros O.F., Théry H., Mello N.A., Gratão L.H.B. 2007. *Atlas ambiental da cidade de Londrina*. Universidade Estadual de Londrina, Londrina. Disponível em: <http://www.uel.br/atlasambiental>. Acessado em 10 jun 2008.
- Batty, M. & Longley, P. 1994. *Fractal cities: a geometry of form and function*. Academic Press Lim., Londres, 394 pp.
- Bell, G. & Tyrwhitt, J. 1972a. *Human identity in the urban environment*. Penguin Books, Middlesex, 656 pp.
- Bell, G. & Tyrwhitt, J. 1972b. The example of the Tokaido Megalopolis. In: Bell, G. & Tyrwhitt, J. 1972. *Human identity in the urban environment*. Penguin Books, Middlesex, p.: 533-540
- Brinkhoff, T. 2007. *The principal agglomerations of the world*. Disponível em: <http://www.citypopulation.de>. Acessado em 15 jun 2008.
- Carvalho, E.T. de. 1999. *Geologia urbana para todos : uma visão de belo horizonte*. E.T. Carvalho, Belo Horizonte, 175 pp.
- Chew, S.C. 2001. World ecological degradation; accumulation, urbanization, and deforestation 3000 B.C. – A.D. 2000. Alta-Mira Press, Walnut Creek, CA, 216 pp.
- DF, Distrito Federal. 2006. *Atlas Ambiental do Distrito Federal*. Governo do Distrito Federal, Brasília, 56 pp.
- Dogan, M. & Kasarda, J.D. 1988c. Introduction: how giant cities will multiply and grow. In: M. Dogan & J.D. Kasarda (eds.) 1988a. *The metropolis Era: a world of giant cities*. v.1. Sage, Londres, p.: 12-29.
- Dogan, M. & Kasarda, J.D. (eds.) 1988a. *The metropolis Era: a world of giant cities*. v.1. Sage, Londres, 394 pp.
- Dogan, M. & Kasarda, J.D. (eds.) 1988b. *The metropolis Era: Mega-Cities*. v.2. Sage, Londres, 322 pp.
- Dorst, J.A. 1973[1971]. *Antes que a natureza morra*. Edgard Blücher, São Paulo, 394 pp.
- Doxiadis, C.A. 1967. The coming world-city: ecumenopolis. In: Toynbee, A. (ed.) 1967. *Cities of destiny*. McGraw-Hill, Nova York, p.: 336-358.
- Doxiadis, C.A. 1968. Ekistics: an introduction to the science of human settlements. Hutchinson, Londres, 527 pp.
- Doxiadis, C.A. & Papaioannou, J.G. 1974. *Ecumenopolis: the inevitable city of the future*. Publishing Center, Athens, Athens 368 pp.
- FATMA, Fundação Do Meio Ambiente de Santa Catarina. 2002. *Atlas Ambiental da Região de Joinville; complexo hidrográfico da Baía da Babitonga*. Fatma; GTZ, Joinville, 68 pp.
- Fleming, F. (ed.) 1993. *A evolução das cidades*. Abril Livros, Rio de Janeiro; Time-Life, Nova York, 176 pp.
- Fyfe, W.S. 1991. Our planet observed: the assault by *Homo sapiens*. In: C. Mungall & D.J. McLaren 1991. *Planet under stress; the challenge of global change*. Oxford University Press, Oxford, p.: 1-29
- Geddes, P. 1915. *Cities in evolution: an introduction to the town planning movement and to the study of civics*. Williams and Norgate, Londres, 232 pp.
- Geikie, A. 1901. *The scenery of Scotland viewed in connection with its physical geology*. Macmillan, Londres, 580 pp.
- Gilbert, A. (ed.). 1996. *The mega-city in Latin America*. United Nations University Press, Tóquio, 482 pp.
- Girardet, H. 1992. *The Gaia Atlas of cities; new directions for sustainable urban living*. Gaia Books, Londres, 191 pp.
- Gottdiner, M. & Hutchison, R. 2006. *The new urban sociology*. 3ed. Westview Press, Nova York, 432 pp.
- Gottman, J. 1961. *Megalopolis; The urbanized Northeastern seaboard of United States*. Twentieth Century Fund, Nova York, 810 pp.
- Goudie, A. 2000. *The human impact on the natural environment*. 5ed. MIT Press, Cambridge, 511 pp.
- GSC, Geological Survey of Canada. 2008. *Urban geology*. GSC, Ottawa. Disponível em: http://gsc.nrcan.gc.ca/urbgeo/index_e.php. Acessada em 10 jun 2008.
- Hardoy, J.E., Mitlin, D., Satterthwaite, D. 2001. *Environmental problems in an urbanizing world*. Earthscan, Londres, 448 pp.
- Hough, M. 1984. *City form and natural process*. Nova York, Van Nostrand Reinhold, 281 pp.
- ICM, Institut Català de la Mediterrània. 1999. *Atlas Ambiental del Mediterráneo; la estructura del territorio y del paisaje*. Institut Cartogràfic de Catalunya, Estudi Ramon Folch, Institut Català de la Mediterrània, Barcelona, 220 pp.
- Legget, R.F. 1973. *Cities and geology*. McGraw-Hill, Nova York, 624 pp.
- Leveson, D. 1980. *Geology and the urban environment*. Oxford University Press, Oxford, 386 pp.
- Lovelock, J.E. 1979. *Gaia: a new look of life on earth*. Oxford University Press Oxford.,
- Lowder, S. 1987. *Inside the third world city*. Croom Helm, Londres, 420 pp.
- Marrero, T. Del M.L. & Colon, N.V. 2006. *Atlas Ambiental de Puerto Rico*. Editorial Universidad de Puerto Rico, Porto Rico, 160 pp.
- Mayhew, S. & Penny, A. 1992. *The concise Oxford dictionary of*

- Geography*. Oxford University Press, Oxford, 186 pp.
- McGill, J.T. 1964. *Growing importance of urban geology*. United States Geological Survey, Washington, Circular 487.
- Meadows, D.H. & Meadows, D.L. (eds.) 1972. *The limits to growth: a report for the Club of Rome's Project on the predicament of Mankind*. Universe Books, New York, 268 pp.
- Menegat, E. 2003. *Limites do Ocidente; um roteiro para o estudo da crise de formas e conteúdos urbanos*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Planejamento Urbano e Regional, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 229 pp.
- Menegat, M. 2006. *O olho da barbárie*. Expressão Popular, São Paulo, 351 pp.
- Menegat, R. 2000. Educação ambiental integrada: o exemplo do Atlas Ambiental de Porto Alegre. In: A. Krug (org.) *Utopia e democracia "os inéditos viáveis" na educação cidadã*. Edufrgs, Porto Alegre, p.: 507-522.
- Menegat, R. 2002a. Participatory democracy and sustainable development: integrated urban environmental management in Porto Alegre, Brazil. *Environment and Urbanization*, 2: 181-206.
- Menegat, R. 2002b. Participatory democracy in Porto Alegre, Brazil. *Participatory Learning and Action (PLA)*, 44: 8-11.
- Menegat, R. (coord.) 2008. *Visões da Terra, entre deuses e máquinas, qual o lugar da humanidade no mundo em que vivemos*. Museu da Ufrgs, Porto Alegre, 96 pp.
- Menegat, R., Fernandes, L.A.D., Koester, E., Scherer, C.M. Dos S. 1998. Porto Alegre antes do Homem: evolução geológica. In: R. Menegat, M.L. Porto, C.C. Carraro, L.A.D. Fernandes (coords.) 1998. *Atlas Ambiental de Porto Alegre*. Editora da Universidade, Porto Alegre, p.: 11-20.
- Menegat, R., Porto, M.L., Carraro, C.C., Fernandes, L.A.D. (coords.) 2006. *Atlas Ambiental de Porto Alegre*. 3ed. Edufrgs, Porto Alegre, 256 pp.
- Mitchell, J.G. & Leen, S. 2001. Urban Sprawl. *National Geographic*, 200(1):48-73.
- Montgomery, M.R., Stren, R., Cohen, B., Reed, H.E. (eds.) *Cities transformed: demographic change and its implications in the developing world (Panel on Urban Population Dynamics)*. Earthscan, Londres, 529 pp.
- MPA, Municipalidad Provincial de Arequipa. 2001. *Atlas Ambiental de Arequipa*. Municipalidad Provincial de Arequipa, Arequipa, 130 pp.
- MPL, Municipalidad Provincial de Lima. 2008. *Atlas Ambiental de Lima*. Municipalidad Provincial de Lima, Lima, 240 pp.
- MPT, Municipalidad Provincial de Trujillo. 2002. *Atlas Ambiental de la Ciudad de Trujillo*. Trujillo, Municipalidad Provincial de Trujillo, 121 pp.
- Mumford, L. 1952[1944]. A condição do homem; uma análise dos propósitos e fins do desenvolvimento humano. Globo, Porto Alegre, 503 pp.
- Mumford, L. 1970[1938]. *The culture of cities*. Harvest/ BJ, Nova York, 586 pp.
- Mumford, L. 1970[1964]. *The Myth of the machine*. Harcourt Brace Jovanovich, Nova York, 496 pp.
- Mumford, L. 1998 [1961]. *A cidade na história; suas origens, transformações e perspectivas*. 4ed. Martins Fontes, São Paulo, 741 pp.
- Nabel, P.E. & Kullock, D. 2006. *Atlas Ambiental de Buenos Aires*. Centro de Investigaciones Geoambientales del Museo Argentino de Ciencias Naturales-CONICET, Buenos Aires, 111 pp.
- Nabel, P.E. & Kullock, D. 2006. *Atlas Ambiental de Buenos Aires*. Disponível em: www.atlasde buenosaires.gov.ar/. Acessado em 15 jun 2008.
- Nagashima, C. 1972. Megalopolis in Japan. In: G. Bell & J. Tyrwhitt 1972. *Human identity in the urban environment*. Pen- guin Books, Middlesex, p.: 541-556.
- National Geographic Society. 1992. *National geographic atlas of the world*. 6ed. National Geographic Society, Washington, 136 pp.
- ONU, Organização das Nações Unidas, Departamento de Economia e Questões Sociais (Undesa). 1985. *Estimates and projections of urban, rural, and city populations, 1950-2025: the 1982 assessment*. ONU, Nova York, 198 pp.
- ONU, Organização das Nações Unidas, Departamento de Economia e Questões Sociais (Undesa), Divisão de População. 2007. *World population prospects: the 2006 revision; executive summary*. ONU, Nova York, 32 pp.
- ONU, Organização das Nações Unidas, Departamento de Economia e Questões Sociais (Undesa). 1986. *Population growth and policies in mega-cities: Seoul. Population Policy*, Paper n.4. ONU, Nova York, 43 pp.
- Papaioannou, J.G. 1964. *The city of the future: population projections for Ecumenopolis*. Athens Center of Ekistics, Atenas, 186 pp.
- Park, R.E., Burgess, E., Mckenzie, R. 1925. *The City*. University of Chicago Press, Chicago, 342 pp.
- Peloggia, A.U.G. 1998. *O homem e o ambiente geológico, geologia, sociedade e ocupação urbana no Município de São Paulo*. Xamã, São Paulo, 1998, 271 pp.
- PMA, Prefeitura Municipal de Araquara. 2004. *Atlas Urbano e Ambiental de Araquara*. Prefeitura Municipal de Araraquara; UFSCAR; UNESP, Araraquara.
- PMR, Prefeitura Municipal de Recife. 1999. *Atlas Ambiental de Recife*. Prefeitura Municipal de Recife, Fundo Municipal do Meio Ambiente, Recife, 180 pp.
- PMS, Prefeitura Municipal de Salvador. 2006. *Atlas Ambiental infanto-juvenil de Salvador; e diretrizes da educação ambiental*. Prefeitura Municipal de Salvador, Salvador, 86 pp.
- Reps, J.W. 1998. *Bird's eye views; historic lithographs of North American Cities*. Princeton Architectural Press, Nova York, 116 pp.
- Sattler, M.A. 2004. Edificações sustentáveis: interface com a natureza do lugar. In: R. Menegat & G. Almeida 2004. *Desenvolvimento sustentável e gestão ambiental nas cidades; estratégias a partir de Porto Alegre*. Edufrgs, Porto Alegre, p.: 259-288.
- Sepe, P.N. & Takia, H. (Orgs.) 2004. *Atlas Ambiental de São Paulo*. Prefeitura Municipal de Secretaria Municipal do Verde e Meio Ambiente, São Paulo; 266 pp.
- Serres, M. 1997. *A origem da geometria*. Terramar, Lisboa, 191 pp.
- Theordorson, G.A. 1982. *Urban patterns; studies in human ecology*. Pennsylvania State University Press, Filadelfia, 470 pp.
- Toynbee, A. 1967. Cities in history. In: A. Toynbee (ed.) 1967. *Cities of destiny*. McGraw-Hill, Nova York, pp. 11-28.
- Tucci, C.E.M. 2006. Água no meio urbano. In: A.C. Rebouças, B. Braga, J.G. Tundisi 2006. *Águas doces no Brasil; capital ecológico, uso e conservação*. Escrituras, São Paulo, p.: 399-432.
- Wackernagel, M. & Rees, W. 1996. *Our ecological footprint*. New Society Pub., Gabriola Island, 160 pp.
- Welter, V.M. 2003. *Biopolis: Patrick Geddes and the City of Life*. MIT Press, Cambridge, 379 pp.
- Williams, M. 1992. *Americans and their forests*. Cambridge University Press, Cambridge, 624 pp.
- Williams, M. 2002. *Deforesting the Earth: from prehistory to global crisis*. Chicago University Press Chicago, 715 pp.
- Zellner, P. & Ruby, A. (eds.) 2000. *Southern California: a megalopolis in the making*. G & B Intl, Nova York, 340 pp.

O interior da Terra: características e implicações na dinâmica do planeta

Umberto Giuseppe Cordani e Colombo Celso Gaeta Tassinari

Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo / CNPq

Rua do Lago, 562, CEP 05508-080, São Paulo, SP, ucordani@usp.br e ccgtassi@usp.br

O interior da Terra: Características e implicações na dinâmica do Planeta

Umberto Giuseppe Cordani e Colombo Celso Gaeta Tassinari

Resumo A Terra formou-se há 4,57 Ga. Por analogia com os tipos conhecidos de meteoritos, conclui-se que sua estrutura interna é formada por uma crosta delgada, e um manto silicático que recobre um núcleo metálico. No manto, a cerca de 200 km de profundidade, encontra-se uma camada com comportamento plástico, a astenosfera. A parte rígida situada acima dela, que inclui a totalidade da crosta, é a litosfera. O núcleo, constituído de ferro e níquel é líquido, em sua camada, externa e sólido na interna. A temperatura aumenta para o interior do planeta, atingindo no núcleo interno por volta de 5500 °C. As principais fontes da energia interna se localizam no limite entre manto e núcleo externo, onde existe uma camada de alta temperatura, cerca de 1000 °C mais elevada do que o material adjacente. Os movimentos das placas litosféricas são tangenciais à superfície, e em seus limites concentra-se a geodinâmica terrestre. Em eventos vulcânicos de caráter especial, grandes províncias magmáticas podem ser formadas por plumas ascendentes no manto. Magmas formados no mobilismo horizontal da tectônica de placas, ou no verticalismo das plumas mantélicas, são versões da mesma moeda, pois co-existiram durante praticamente todo o tempo geológico. No Arqueano predominava o regime de plumas, enquanto que no Fanerozóico, magmatismo ligado à tectônica de placas prevaleceu. A dinâmica interna pode alterar as condições climáticas da superfície, influindo nas condições de vida do planeta. Como exemplo, as épocas de grande vulcanismo têm coincidido, aproximadamente, com importantes períodos de extinção de espécies.

Palavras-chave: Estrutura Interna da Terra; Tectônica de Placas; Geomagnetismo; Sismologia; Grandes províncias Magmáticas, Geodinâmica

Abstract *THE EARTH'S INTERIOR: CHARACTER AND GEODYNAMIC IMPLICATIONS* The Earth formed 4.57 Ga ago. By analogy with the parental bodies of meteorites, the internal structure of the Earth is considered to be formed by a very thin crust, and a voluminous silicate mantle including a metallic nucleus. Within the mantle, the astenosphere, about 200 km deep, is a layer with plastic behavior, covered by the lithosphere, the external rigid layer which includes the entire crust. The nucleus, made up by iron and nickel, is liquid in the external part and solid in the inner part. The temperature increases with depth, reaching about 5500 °C at the center of the Earth. The main sources of the internal energy seem to be located within a hot layer at the boundary between mantle and nucleus. The lithospheric plates move tangentially to the surface of the planet, and at their limits most of the Earth's geodynamics is concentrated. In addition, large igneous provinces may be formed by the activity of hot mantle plumes. Magmas produced by plate tectonics or by plumes were co-existent during the entire geologic time. In the Archean plumes were the main source of magmatism, while during the Phanerozoic magmatism due to plate tectonics was predominant. The internal dynamics of the planet may have a role at its surface, modifying atmosphere, climate, and influencing the life support systems. As an example, the timing of very large volcanic events in Earth's history seem to coincide with important extinction periods observed in the geological record.

Keywords: Earth Internal Structure; Plate Tectonics; Large Igneous Provinces; Geomagnetism; Seismology; Geodynamics.

INTRODUÇÃO O homem pode conhecer bem o que acontece a milhares de quilômetros acima de nossas cabeças, mas não consegue saber com a mesma precisão o que acontece a algumas centenas de quilômetros abaixo de nossos pés. Isto é verdade porque não temos como observar diretamente o material e os processos que ocorrem abaixo de uma dezena de quilômetros. Tudo o que sabemos é estabelecido com base em evidências indiretas, tais como estudos de meteoritos, planetologia comparada, estudos de petrologia experimental, bem como evidências geofísicas oriundas de estudos do magnetismo terrestre, do comportamento de ondas sísmicas e do fluxo térmico do planeta. Este trabalho reúne alguns comentários sobre a constituição interna do planeta Terra sobre sua dinâmica e fontes de energia, bem como sobre alguns aspectos de como o interior da Terra pode influenciar o que ocorre em sua superfície.

EVOLUÇÃO PRIMITIVA DO PLANETA TERRA A Terra formou-se há 4,57 bilhões de anos atrás, ao mesmo tempo do que o Sol e os demais planetas do Sistema Solar, através de condensação de gases e aglutinação e acreção da poeira cósmica existente na nebulosa solar. Portanto a Terra, nos primórdios de sua formação, consistia de uma mistura caótica de materiais que foi mantida coesa pela atração gravitacional. A evolução do planeta está relacionada a um processo de diferenciação geoquímica, envolvendo a transformação daquela mistura caótica de materiais em um corpo estruturado em camadas concêntricas diferentes entre si.

A chave para caracterizar o material existente no interior da Terra é o estudo de meteoritos, que são fragmentos de matéria sólida provenientes do espaço extraterrestre, especificamente do cinturão de asteróides, situado no es-

paço orbital entre os planetas Marte e Júpiter. Estes corpos são formados simultaneamente aos planetas mais próximos do Sol, no mesmo processo de acreção. Entretanto os seus corpos parentais nunca conseguiram atingir dimensões planetárias, visto que vários protoplanetas foram formados na mesma órbita, e acabaram colidindo entre si, despedaçando-se nos muitos milhares de fragmentos que constituem os asteróides. Dependendo do tamanho adquirido, os corpos parentais dos meteoritos sofreram ou não o mesmo processo de diferenciação sofrido pela Terra, separando-se em zonas concêntricas. Dessa forma, alguns tipos de meteoritos, especificamente aqueles fragmentos dos corpos diferenciados que penetram na atmosfera da Terra podem revelar, pela analogia dos processos de formação e diferenciação, a composição das zonas internas dos planetas não gasosos do sistema solar, ou seja Mercúrio, Vênus, Terra e Marte.

A figura 1, adaptada de Cordani e Sigolo, 1997, mostra esquematicamente a formação dos diversos tipos de meteoritos, e a sua proveniência a partir de zonas internas de seus corpos parentais.

Os meteoritos não diferenciados, testemunhos da mistura caótica de materiais formada no processo de acreção planetária, são os condritos, representam cerca de 86% do total recebido na superfície da Terra, e são constituídos por materiais silicáticos (olivina + piroxênio) e materiais metálicos. Sua composição química é próxima da abundância solar dos elementos, e são considerados os corpos mais primitivos do Sistema Solar acessíveis para estudos diretos. Por outro lado, os meteoritos diferenciados podem se dividir, segundo sua composição, em sideritos (abundância 4%), siderólitos (abundância 1%) e aerólitos ou pétreos do tipo acondrito (abundância 9%). Os sideritos são essencialmente metálicos, com 5 a 10% de Ni, e representam com toda probabilidade material proveniente de fragmentos do núcleo interno de corpos parentais diferenciados. Seus minerais são ligas de Fe e Ni, e não são conhecidos nas rochas terrestres. Siderólitos são meteoritos constituídos por uma mistura de silicatos, distribuídos em uma matriz metálica, e são originados da mesma forma do interior de corpos diferenciados. Por sua vez, meteoritos do tipo acondrito são compostos por minerais conhecidos nas rochas terrestres, tais como olivina, plagioclásio e piroxênio. São considerados representantes do material silicático envolvente do núcleo dos corpos parentais diferenciados, que guardariam completa analogia com o material do manto da Terra. Além disso, alguns acondritos são bastante similares a tipos de basalto, rocha comum na crosta terrestre.

A figura 2 mostra o cenário dos primeiros 800 milhões de anos da história da Terra. Nesse contexto, é crucial o processo de diferenciação geoquímica primária, com a separação entre núcleo metálico e manto silicático. Começa com uma massa planetária fundida, alto fluxo térmico e elevada energia interna. Impactos de planetésimos na fase final da acreção planetária transformam energia de movimento em calor, e o consequente aumento de temperatura interna é acelerado pela desintegração de elementos radioativos, tais como ^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th , ^{40}K , além de muitos outros isótopos radioativos de meia-vida mais curta, hoje

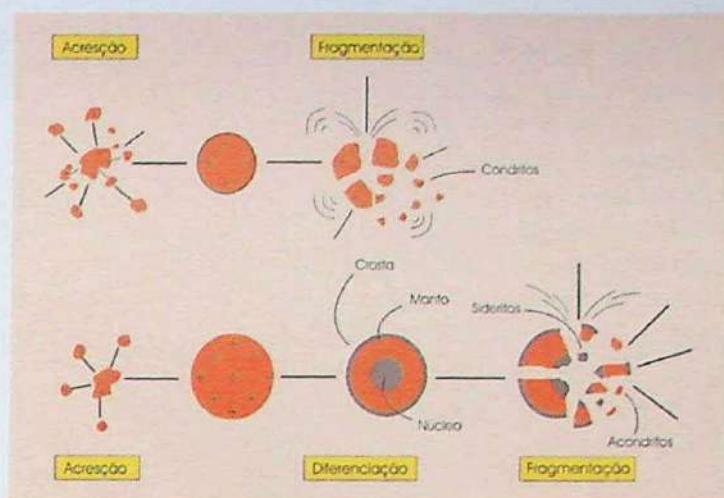


Figura 1: Esquema simplificado para a origem dos meteoritos (adaptada de Cordani e Sigolo, 1997)

extintos na natureza. O material mais denso afunda e tende a se concentrar no interior da Terra ao passo que o material mais leve, menos denso, flutua concentrando-se na parte mais superficial do planeta. A subida do material mais leve conduz o calor interno para a superfície, dissipando-o, e a Terra, consequentemente, vai se resfriando e solidificando, transformando-se em um planeta zonado e diferenciado em três camadas principais, núcleo, manto e crosta, esta última como uma camada externa, de espessura muito pequena, formada por diferenciação do material mantélico. No núcleo se concentrariam os elementos chamados siderófilos, com afinidade ao ferro, e no manto estariam principalmente compostos de silício e oxigênio, com quantidade relevante de Fe e Mg. A crosta inclui, além dos mencionados, elementos mais leves, como Al, Ca, K, e Na, combinados com elementos incompatíveis nos minerais mantélicos, tais como U, Th e outros elementos pesados.

ESTRUTURA INTERNA DA TERRA As perfurações mais profundas efetuadas na Terra atingem no máximo uma dezena de quilômetros de profundidade, de modo que têm que ser utilizadas evidências indiretas para a investigação da natureza, composição e condições físico-químicas dos materiais existentes no interior do planeta. A ferramenta mais utilizada é a sismologia, a ciência que estuda a propagação das ondas sísmicas que atravessam o interior da Terra e que servem para demonstrar a sua estrutura interna. Ondas sísmicas podem ser produzidas por fatores naturais, como sismos de distintas magnitudes, ou serem induzidas artificialmente, como, por exemplo, por explosões. A sua forma de propagação informa as características físicas dos materiais atravessados. Existem dois tipos principais de ondas sísmicas: as primárias conhecidas como ondas P, e as secundárias, denominadas de ondas S. As ondas P movimentam o material comprimindo-o e dilatando-o, e o movimento das partículas é paralelo à direção de propagação da onda, como no caso das ondas sonoras. Por outro lado, as ondas S movimentam as partículas do material perpendicularmente à direção de propagação das ondas. A velocidade de propagação das ondas P e S dependem da densidade, das propriedades elásticas

OS PRIMEIROS 800 MILHÕES DE ANOS

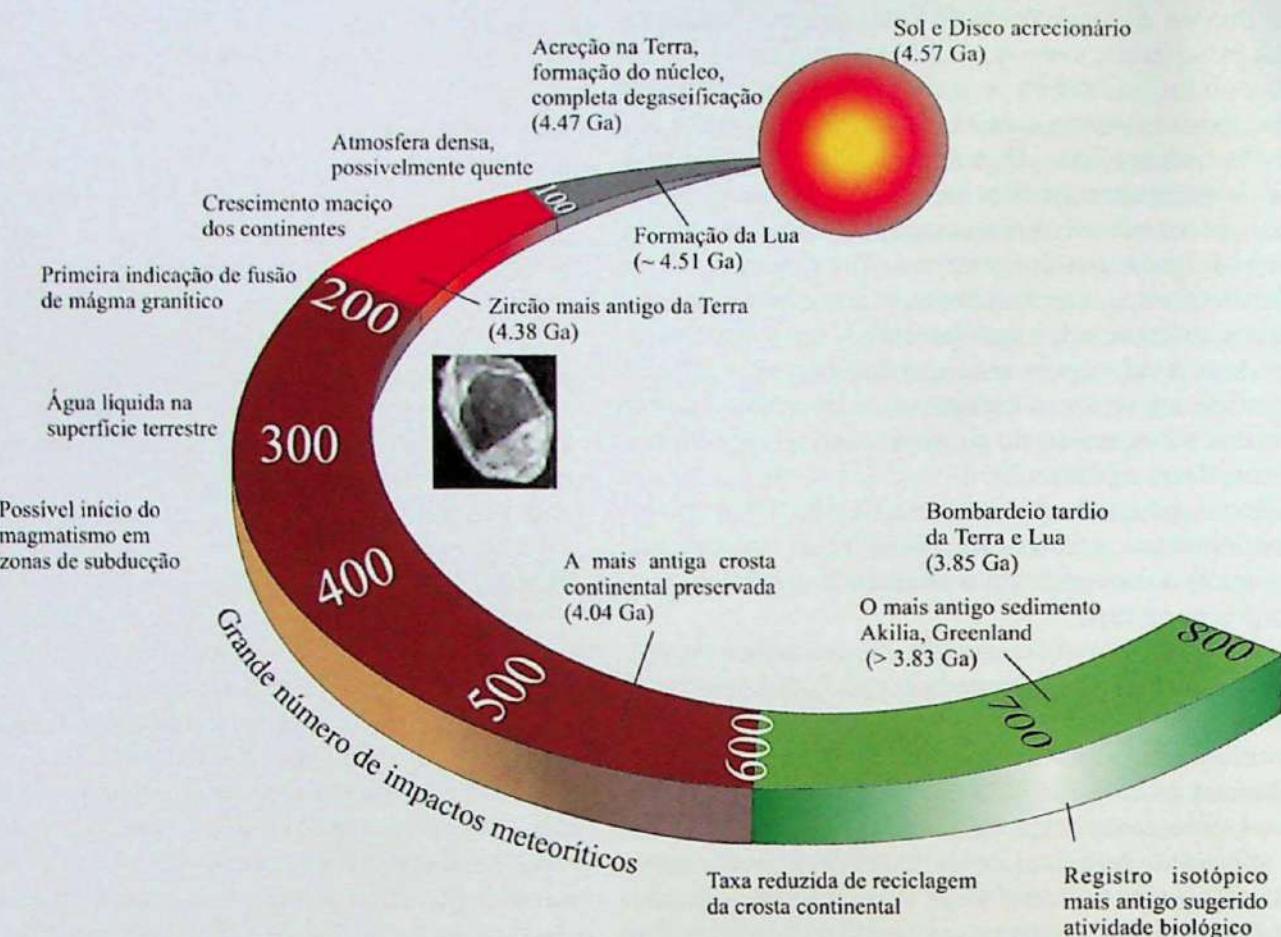


Figura 2: Representação do cenário dos primeiros 800 milhões de anos da história da Terra. Corpos parentais com tamanhos acima de certo valor crítico sofreram diferenciação, ao contrário dos menores.

e da resistência à compressibilidade e à deformação de cisalhamento dos materiais atravessados. Para o caso das ondas do tipo S, quando a resistência à deformação de cisalhamento é nula, como nos líquidos, a velocidade é zero e essas ondas não se propagam neste meio.

Quando ocorrem rupturas ou movimentações de rochas na parte sólida do interior do planeta ocorre liberação de energia, que é propagada pelas ondas P e S e provoca sismos, os quais são registrados nas estações sismográficas. A propagação é então registrada nos sismogramas, cuja análise permite o estabelecimento das características do sismo, como a localização do epicentro, a profundidade do hipocentro, bem como o cálculo da velocidade das ondas geradas. Como as ondas P e S possuem velocidades que variam em função da natureza dos materiais atravessados, as estações sismográficas localizadas em várias regiões do mundo receberão os sinais dessas ondas em tempos distintos. Em muitos casos nem mesmo receberão esses sinais, uma vez que podem ocorrer as chamadas zonas de sombra (figura 3).

A análise de telesismos, ou seja, os sismos localizados a pelo menos 2000 km dos sismógrafos receptores, mostra que o interior da Terra é constituído por três camadas principais, que exibem diferenças importantes, separadas por descontinuidades (zonas de mudança brusca de velocida-

de das ondas P e S). Trata-se de manto (sólido), núcleo externo (líquido) e núcleo interno (sólido). Como é indicada na figura 4 a descontinuidade de Gutenberg, a 2900 km de profundidade, separa o manto do núcleo externo. Por sua vez a descontinuidade de Lehman, a 5100 km de profundidade, separa o núcleo externo do núcleo interno. Por outro lado, a análise dos sismos localizados mais próximos das estações sismográficas, até cerca de algumas centenas de quilômetros, permitem definir a estrutura dos materiais da crosta terrestre. A descontinuidade sísmica entre crosta e manto, denominada de Mohorovicic (ou mais brevemente de Moho), situa-se a 5-10 km de profundidade na crosta oceânica e a 30-40 km na crosta continental.

A dinâmica interna do planeta tem suas origens nos fluxos de material no manto, constituído por minerais silicáticos, e que se encontra quase que totalmente no estado sólido. Caracterizando o comportamento das ondas sísmicas em seu interior, verifica-se que, de um modo geral, a sua velocidade de propagação tende a aumentar com a profundidade. Entretanto, entre 100 e 300 km de profundidade, as ondas sísmicas do tipo S sofrem uma diminuição de velocidade, definindo uma zona com características físicas mais plásticas, onde ocorreria certa quantidade de material líquido. Esta zona é conhecida como astenosfera, ou zona de baixa velocidade. A parte rígida do planeta

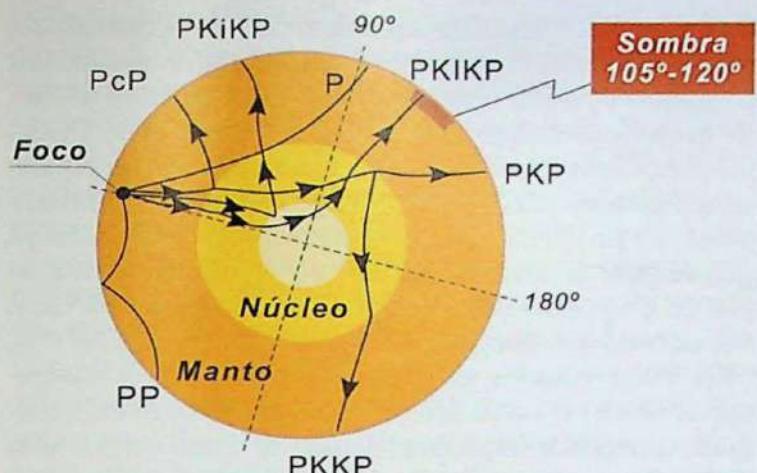


Figura 3: Comportamento das ondas sísmicas no interior da Terra (adaptada de Teixeira et al., 2000)

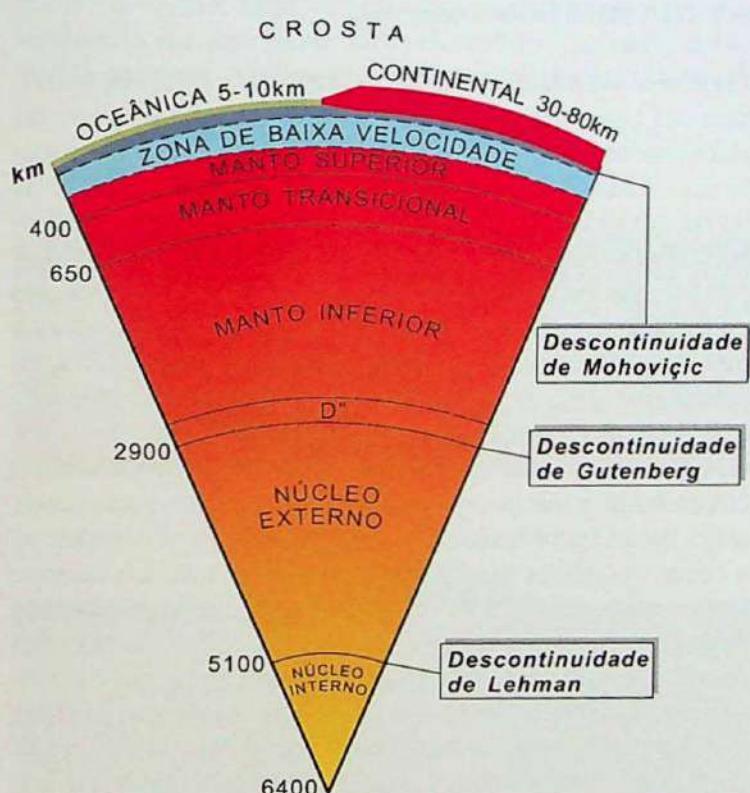


Figura 4: Estrutura interna da Terra (adaptada de Teixeira et al., 2000)

situada acima da astenosfera, que inclui a totalidade da crosta terrestre, mais uma porção importante do manto superior, é denominada de litosfera.

É demonstrado que para o núcleo externo a temperatura estimada pela curva da geotermia é superior à temperatura do ponto de fusão do material existente, o que implica em admitir o seu estado de fusão. Isto ocorre também, embora parcialmente, na parte superior do manto, e especificamente na astenosfera, na região de baixa velocidade das ondas S.

Composição química e mineralógica do interior da Terra Para a determinação da composição dos materiais que ocorrem no interior do planeta pode-se utilizar

a caracterização petrográfica e geoquímica de xenólitos mantélicos, trazidos pelos vulcões para a superfície da Terra. De qualquer forma são essenciais as analogias já descritas com os diversos tipos de meteoritos e das rochas lunares, e com os dados trazidos da planetologia comparada. Além disso, dados geofísicos são utilizados largamente nos modelos correntes sobre a composição de manto e núcleo do planeta (ver por exemplo Anderson, 1989). Os principais são os derivados do estudo do magnetismo terrestre, do fluxo térmico, pela medida do gradiente de calor em função da condutividade termal das rochas, e da petrologia experimental, que indica as condições físico-químicas de estabilidade dos possíveis minerais existentes no interior da Terra.

A caracterização dos distintos tipos de acondritos, aliada com o conhecimento da composição de xenólitos mantélicos encontrados em meio às lavas de muitos vulcões em todo o globo, e levando em conta os estudos de petrologia experimental, tem permitido o estabelecimento da química e da mineralogia das camadas superiores da Terra, crosta e manto. A crosta, acessível para estudo direto, é constituída principalmente por feldspatos, quartzo e micas, além de minerais ferromagnesianos tais como piroxênios, anfibólios e olivina. Pela determinação da profundidade da Moho, já comentada, sabe-se que a crosta continental possui espessura média de uns 35 km e a crosta oceânica por volta de 8 km. Suas densidades médias dependem de suas composições químicas e mineralógicas. A crosta continental, de composição média granítica, possui densidade de cerca 2,7 g/cm³, enquanto que a crosta oceânica, de composição média basáltica, possui densidade de cerca 2,9 g/cm³.

Abaixo da Moho ocorre o manto superior litosférico, composto predominantemente por minerais tais como olivina, piroxênios e granadas, formadores de rochas ultramáficas mais densas, tais como peridotito e piroxenito, cujas densidades estão entre 3,2 g/cm³. Dentro do manto, em profundidades normalmente superiores a 100 km, ocorre a astenosfera, cuja composição química e mineralógica é similar à do manto litosférico, mas o seu comportamento envolve maior mobilidade de seu material em virtude da presença de certa quantidade de fase líquida. Para as camadas abaixo da astenosfera, acredita-se que a composição química média permaneça mais ou menos similar, mas as fases minerais teriam que adquirir um "packing" mais denso para os seus átomos, em virtude das altas pressões confinantes admitidas para as zonas inferiores. No limite manto-núcleo, descontinuidade de Gutenberg à profundidade de 2900 km, a temperatura atinge cerca de 4000°C.

A analogia com os sideritos, provenientes do núcleo dos corpos parentais dos meteoritos, bem como a combinação de evidências geofísicas, e de resultados teóricos e experimentais, permite deduzir que o núcleo, constituído de Fe, Ni e traços de O e S, ocupa 1/6 do volume da Terra e 1/3 de sua massa, e como consequência possui a densidade variando entre 9 até 12 g/cm³ no centro do planeta. Como já foi visto, o núcleo externo é líquido e estima-se que seja constituído por 80% de Fe, 5% de Ni e 15% de elementos mais leves, tais como Si, O e S. Na

descontinuidade de Lehman, à profundidade de 5000 km, a temperatura é da ordem de 5200 °C. No núcleo interno a temperatura estimada é de 5500 °C, e a velocidade de propagação das ondas P aumenta significativamente, indicando que o material se comporta como um sólido.

Magnetismo terrestre A Terra se comporta como um imenso imã, cujo campo magnético possui intensidade atual aproximada de $50\ 000 \times 10^{-9}$ T (T=Tesla) e seu eixo está próximo do eixo geográfico do planeta, de modo que as agulhas imantadas das bússolas orientam-se sempre para o norte. Gauss (1830) já indicava que cerca de 95% do campo magnético do planeta originava-se no interior da Terra. Este campo geomagnético, que possui forma semelhante àquele gerado por um grande imã em barra, forma o escudo magnético da Terra definindo a magnetosfera, cujo alcance vai muito além do planeta sólido, incluindo praticamente toda a atmosfera. Este escudo protege a Terra dos raios cósmicos, do vento solar, e especialmente das partículas de alta velocidade emitidas pelas freqüentes erupções solares, que somente conseguem atingir a atmosfera superior (80 km de altitude) nas regiões polares, onde as linhas de força do campo magnético terrestre penetram quase que perpendicularmente à linha do equador.

A presença e a quantidade dos minerais magnéticos da crosta não são suficientes para produzir o campo geomagnético observado. Por outro lado o núcleo externo da Terra é fluido e o movimento do seu material, essencialmente metálico, poderia induzir a formação de um campo com as propriedades observadas. Com efeito, o campo geomagnético possui eixo situado muito próximo do eixo de rotação do planeta, o que indicaria que o fluxo de material metálico no interior do núcleo externo estaria relacionado com esse movimento. Dessa forma, o campo geomagnético possui geometria definida e relacionada ao eixo de rotação, e as evidências paleomagnéticas indicam que ele existiu durante todo o tempo geológico. Por outro lado verificou-se que, embora o campo tenha guardado íntima relação com o eixo de rotação da Terra, sua polaridade se inverteu inúmeras vezes, e sua intensidade variou bastante, ocasionando inclusive períodos discretos em que esteve virtualmente nulo.

DINÂMICA INTERNA DO PLANETA TERRA Como foi visto nos itens anteriores, a temperatura no interior do planeta aumenta à medida que se segue em direção ao centro da Terra, atingindo no limite manto/núcleo por volta de 4000 °C, e no núcleo interno por volta de 5500 °C. O calor interno da Terra é transportado para a superfície de duas formas distintas, por condução ou por convecção (Condie, 2001, e referências incluídas). Quando realizado por condução, esse transporte de calor, também denominado de fluxo térmico, se dá em meio sólido. Entretanto é mais lento e consiste da transferência de energia de uma molécula para a outra molécula vizinha. Já o processo de transporte de calor por convecção é mais rápido e eficiente, especialmente quando há fase líquida, e consiste da movimentação de massa das zonas mais quentes para as mais frias, ocorrendo tanto no manto como no núcleo da Terra.

O fluxo térmico está associado ao motor responsável pela dinâmica interna do planeta, que afeta todas as camadas do planeta e produz transformações específicas na litosfera, que se manifestam também na superfície, onde afetam biosfera, hidrosfera e atmosfera. Embora exista no planeta algum resto do calor inicial, da época em que se formaram núcleo e manto a partir de uma massa planetária fundida, a grande parte do calor produzido hoje em dia no interior do planeta é resultado da desintegração dos isótopos radioativos de meia-vida longa, tais como o ^{236}U , ^{237}U , ^{232}Th , ^{40}K , ^{87}Rb , ^{147}Sm , e outros, que permanecem dispersos nos minerais do manto ou da crosta, e dos quais ainda existe alguma quantidade importante apesar de terem transcorrido 4,57 bilhões de anos desde a formação da Terra. As fontes de energia interna da Terra, portanto, estão localizadas principalmente no manto, e especialmente na zona limite entre o manto e o núcleo externo, onde existe uma camada de alta temperatura, cerca de 1000 °C mais elevada do que as rochas mantélicas adjacentes.

Tectônica de Placas Como sabemos, a litosfera é dividida em cerca de uma dúzia de placas grandes, e muitas placas menores, que constituem as conhecidas placas tectônicas. Essas placas se movimentam umas em relação às outras em velocidades distintas, que podem variar de menos de um centímetro por ano a uma dezena de centímetros por ano (ver por exemplo Dewey, 2007, e referências incluídas). Alguns mecanismos são responsáveis por este movimento, mas sem dúvida alguma o principal deles é a movimentação das correntes de convecção sub-litosféricas. Estas são originadas em zonas mais quentes do manto, cujo material torna-se menos denso do que o material circundante, e inicia uma ascensão para níveis superiores, até o limite entre litosfera e astenosfera. Para compensar a ascensão destas massas de material mantélico quente, rochas mais densas e frias descem e preenchem o espaço deixado pelo material que subiu, completando o ciclo das células de convecção. As placas tectônicas rígidas se movimentam sobre a superfície mais plástica da astenosfera, e com a sua movimentação os limites entre elas constituem o ambiente principal para a ocorrência dos processos geológicos que dominam a geodinâmica do planeta.

As correntes de convecção do manto, e suas consequências, constituem o paradigma fundamental da revolução mobilista da tectônica global, que transformou as Ciências da Terra, nos anos 60', numa ciência quantitativa, que conseguiu explicar de maneira coerente e integrada as principais feições e os principais processos geodinâmicos observados na escala maior do planeta (por exemplo, ver Le Pichon, 1968) O histórico dessa revolução científica inclui o debate sobre deriva continental, que ocupou muitas décadas do século 20. A série de evidências acumuladas de diversos campos das geociências, nos anos 50 e 60, culminaram por volta de 1967-1970 com a consolidação e aceitação completa do novo paradigma pelos militantes das ciências geológicas e geofísicas (por exemplo, ver Uyeda, 1971).

Os movimentos das placas tectônicas, ou placas litosféricas, as quais podem atingir dimensões continentais, com

milhares de quilômetros de diâmetro, são tangenciais à superfície da Terra, e seus limites podem ser convergentes, divergentes, ou conservativos. Nos limites convergentes ocorre o choque entre duas placas, convergindo uma em direção a outra. As feições geológicas criadas e as modificações produzidas na crosta irão depender da natureza das placas tectônicas envolvidas, se continentais ou oceânicas (Figura 5). No caso de choque de uma placa oceânica com outra da mesma natureza, a placa mais densa irá mergulhar por debaixo da outra, criando uma zona de subducção. Esta placa, a medida que mergulha, vai ganhar calor, perder consistência e se integrar no manto. Ao mesmo tempo, na zona de subducção, magmas serão gerados e arcos magnéticos serão formados, constituídos de material de natureza máfica a intermediária, como nas ilhas do Japão. Para o caso de um processo colisional, envolvendo duas placas de natureza continental, a placa mais densa poderá entrar em subducção, mas não mergulhará de forma acentuada no manto, uma vez que possui densidade significativamente menor. Neste caso de subducção rasa, envolvendo material continental, serão geradas cordilheiras de

montanhas do tipo Himalaia, e os magmas formados nas zonas de subducção serão predominantemente graníticos, formados por processos de retrabalhamento crustal. Por fim, se o limite convergente envolver uma placa oceânica e uma placa continental será gerado um arco magnético de natureza andesítica e granodiorítica, como ocorre na Cordilheira Andina. Nos três casos a presença de sismos é bastante comum, incluindo-se aí terremotos de magnitude muito alta, catastróficos para as comunidades afetadas. A presença de vulcanismo é mais evidente quando há o envolvimento de litosfera oceânica no processo de subducção, e o mergulho dessa placa no manto até algumas centenas de quilômetros de profundidade, ensejando fusão parcial do material e a consequente produção de importante quantidade de magmas.

No caso de limites divergentes entre placas tectônicas desenvolvem-se sistemas de riftes, que podem evoluir para a formação de assolhos oceânicos, com margens continentais passivas. Nos oceanos, as dorsais meso-oceânicas representam os locais de geração de crosta oceânica nova, pela subida de magmas de natureza basáltica, formados a partir de material predominantemente astenosférico, nas partes superiores das correntes de convecção ascendentes do manto. Por sua vez, os limites de placas conservativos apresentam sistemas de falhas transcorrentes/transformantes, onde uma placa desliza horizontalmente em relação à placa vizinha. O exemplo mais conhecido e mais característico é o sistema de falhas de San Andreas na costa oeste da América do Norte.

Grandes Províncias Magmáticas e Hot spots Pelo exposto, as zonas de limites de placas constituem os locais mais propícios para a ocorrência de transformações da litosfera, como resultado da dinâmica interna do planeta. Entretanto, atividades tectono-magnéticas importantes também podem ocorrer no interior das placas tectônicas, em regiões afastadas dos seus limites. A atividade mais espetacular está relacionada às denominadas “Large Igneous Provinces” (LIPs), ou Grandes Províncias Magmáticas (Mahoney e Coffin, 1997).

As LIPs são formadas em eventos vulcânicos maciços que resultam a partir de um tipo de convecção do manto diferente daqueles que dirigem a tectônica de placas na Terra. Elas são constituídas de grandes volumes de magmas predominantemente máficos, gerados durante intervalos curtos de tempo geológico (alguns milhões de anos), por processos mantélicos associados à ascensão das assim chamadas plumas. O magmatismo relacionado à formação das LIPs é gerado em grandes profundidades, possivelmente na região de contato entre o núcleo e o manto, onde pode ocorrer uma produção de calor circunstancialmente elevada. Este tipo de processo magnético é provavelmente o mesmo pelo qual os outros planetas terrestres perdem parcialmente ou totalmente o seu calor interno. A figura 6 mostra a localização e a denominação de algumas LIPs que foram caracterizadas como tais, tanto em ambiente continental (CFB = Continental flood basalts, ou derrames de basaltos continentais) como em ambiente oceânico (OFB = Oceanic flood basalts, ou derrames de basaltos oceânicos). Elas ocorrem como derrames de platô

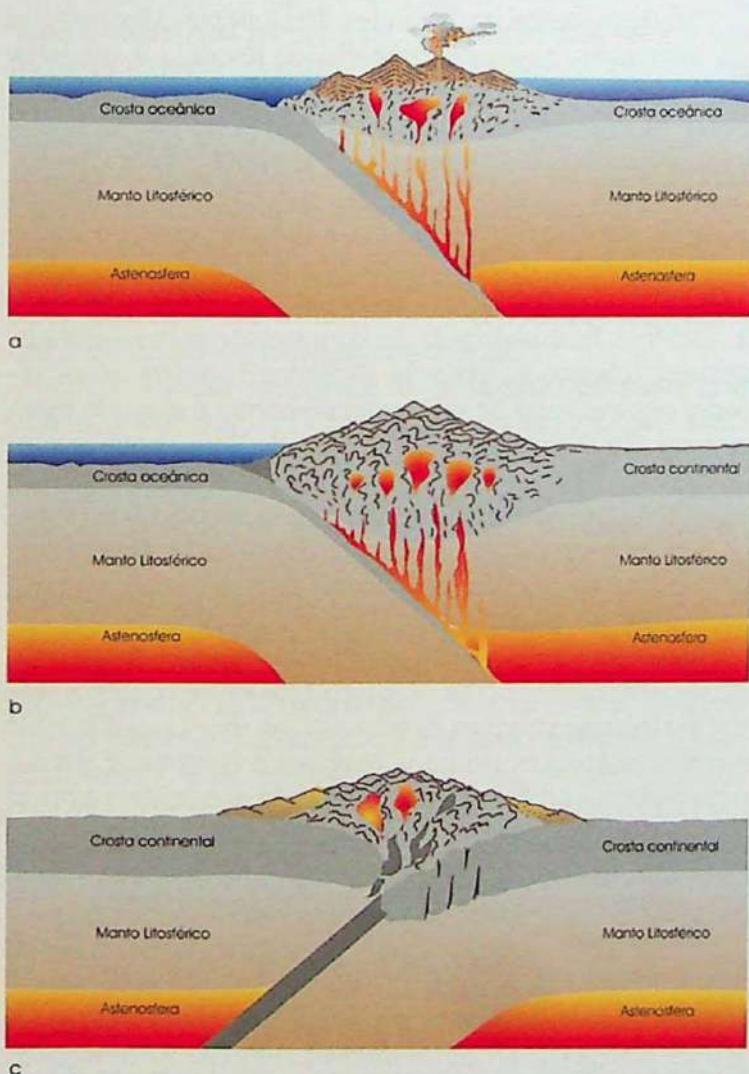


Figura 5: Ilustração esquemática mostrando as feições geradas durante processos de subducção: (a); colisão de duas placas com crosta oceânica; (b), colisão de placa com continental versus placa com crosta oceânica; (c), colisão envolvendo duas placas com crosta continental (adaptada de Tassinari, 2000).

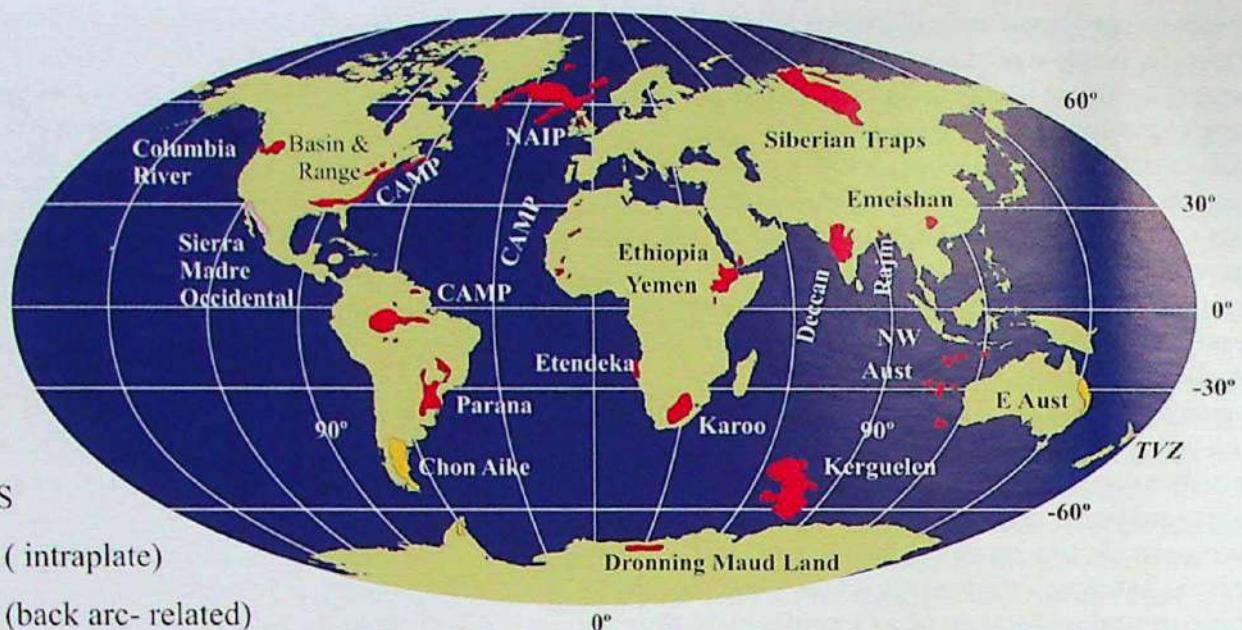


Figura 6: Distribuição na Terra das principais Grandes Províncias Ígneas

continental, margens de riftes vulcânicos, platôs oceânicos, derrames basálticos de bacias oceânicas, cristas submarinas e cadeias montanhosas marinhas, sendo que além de basaltos, rochas felsicas também podem estar associadas. Além disso, as LIPs são melhor preservadas quando relativamente jovens, como ocorre quando sua idade não ultrapassa a Era Mesozóica. Províncias ígneas oceânicas (OFB) geradas em tempos anteriores ao Mesozóico já desapareceram nos episódios de reciclagem da litosfera oceânica nas zonas de subducção pretéritas, enquanto que as continentais (CFB) já se encontram parcialmente erodidas, ou deformadas nas faixas orogênicas de todas as idades.

A figura 6 indica claramente que as LIPs, quando emergem na superfície da Terra, ocupam grandes áreas, da ordem de alguns milhões de Km². As maiores estão localizadas em bacias oceânicas, onde enormes platôs vulcânicos, como os de Java no Oceano Pacífico e o de Kerguelen no Oceano Índico, foram formados. Derrames de lavas basálticas podem ocorrer próximos de margens continentais passivas, como nas plataformas continentais do leste do Brasil e do oeste da Namíbia, quando são associados ao início do processo de separação dos continentes, ou também em ambientes claramente continentais, como os extensos derrames de basaltos da Bacia do Paraná, que se estendem, pelo menos, desde o Mato Grosso e parte noroeste do estado de São Paulo até o Rio Grande do Sul.

A geoquímica das rochas das LIPs, e especialmente a geoquímica de isótopos radiogênicos tais como Sr, Nd e Pb, indica que a geração dos magmas dos OFB é astenosférica, com pequena interação com a litosfera oceânica. Por outro lado, a geração dos magmas dos CFB implica numa forte interação de magmas astenosféricos com a litosfera continental. Em ambos os casos, o mecanismo de formação é similar. Em ambiente tectônico extensional ocorre ascensão do material mantélico de temperatura elevada, formado nas profundezas do manto, e a súbita decompressão devida à rápida ascensão, acarreta formação imediata, em termos de tempo geológico, (por volta de 1-2

milhões de anos) de enormes quantidades de magma.

Freqüentemente as Grandes Províncias Magmáticas são associadas a plumas mantélicas, levando á modelos que relacionam a origem dessas províncias com as correntes de convecção ascendentes do manto sub-litosférico, associadas aos denominados “hot spots” (ver Condie, 2001). Nesta hipótese as plumas consistem de bolhas de material mantélico mais quente e menos denso do que o material vizinho, que subiriam até a litosfera e se espalhariam em forma de enormes cogumelos justamente na base da litosfera, formando pela descompressão já mencionada, grandes volumes de magmas. A figura 7 mostra as localidades em que áreas de vulcanismo recente e elevado fluxo térmico são associadas à existência de “hot spots” e plumas. Nesta figura foram assinaladas duas enormes áreas anômalas observadas no geóide, que se associam no espaço com as áreas de maior fluxo térmico, e que devem corresponder a regiões em que ocorre atualmente convecção ascendente no manto, na escala maior do planeta.

Na formação das LIPs, as plumas quentes necessariamente interageriam com o manto litosférico, que por sua vez pode gerar magmas característicos. No caso dos CFB o debate sobre a origem dos magmas é contínuo e muitos pesquisadores preferem evitar o modelo que postula a priori a existência de “hot spots” e de plumas. Eles preferem utilizar o termo mais genérico de “anomalia térmica” do manto, sem assumir compromisso com o modelo de plumas.

Nas últimas duas décadas a tectônica global e a mobilidade das placas litosféricas foram associadas ao que se convencionou chamar de Ciclo supercontinente (Rogers, 1996). O conceito prende-se à noção de que, em certos períodos da história da Terra, todas ou quase todas as placas contendo crosta continental aglutinaram-se num grande conjunto, denominado supercontinente, com o restante da superfície terrestre sendo domínio de litosfera oceânica. Isto teria ocorrido um certo número de vezes na história da Terra, formando, nas diferentes épocas, Pangea, Gondwana, Rodinia, Columbia, e alguns outros superconti-

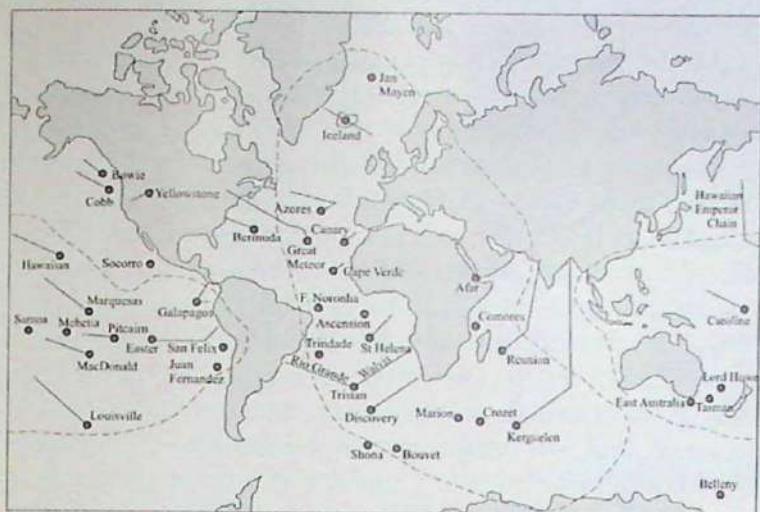


Figura 7: Localização das áreas de vulcanismo recente relacionadas com “hot spots”. As duas grandes regiões delimitadas referem-se a anomalias do geóide, significativas de áreas com alto fluxo térmico, condicionadas a movimentos ascendentes de material quente no manto (adaptada de Condie, 2001)

nentes ainda não plenamente caracterizados. Ocorre que litosfera oceânica conduz muito melhor o calor do que litosfera continental. Dessa forma, o grande desequilíbrio criado com um grande continente e um grande oceano, no sentido da condução de calor para fora do planeta, condiciona um aumento de temperatura anômalo na litosfera continental, que obriga, após certo tempo de instabilidade e fraturamento, com magmatismo anorogênico associado, a fragmentação desta litosfera e a consequente dispersão dos fragmentos com crosta continental.

O ciclo supercontinente, cuja duração estimada é da ordem de 600 milhões de anos, deve estar vinculado a mudanças importantes nos padrões de convecção do manto, e o estabelecimento de uma nova geometria no desenho das placas litosféricas, mantendo aquelas com litosfera continental, que adquirem novas direções de movimento, e reciclando para o manto aquelas com litosfera oceânica, em regiões de subducção recém criadas. Estas épocas de mudança global nos padrões de convecção do manto estão gravadas nas idades dos principais ciclos orogênicos do planeta, que caracterizam as sucessivas colisões continentais e os episódios acrecionários de formação de crosta continental. Ao mesmo tempo a litosfera oceânica é reincorporada no manto, descendo para grandes profundidades, ao que parece em grandes episódios de curta duração, ainda pouco conhecidos, e denominados de “avalanches” (Condie, 1998).

O acima exposto indica que se situa no manto o motor de todos os processos maiores que afetam a litosfera, e produzem as maiores modificações na fisiografia da superfície da Terra. Ao que parece o manto inteiro participa das grandes convulsões do planeta, tanto a parte superior, que inclui a astenosfera plástica e geradora de magmas primários, como a parte inferior, na região adjacente ao núcleo externo, onde se originam as anomalias térmicas e as correntes ascendentes de material aquecido. A dinâmica das placas litosféricas atuais é o melhor registro da

atuação da astenosfera e do manto superior, enquanto que grande parte das LIPs estaria associada a hotspots provenientes de profundidades maiores. No caso da Figura 6, cabe assinalar que as LIPs indicadas estão relacionadas ao fraturamento do supercontinente Pangea, que iniciou há 200 Ma, bem como à dispersão de seus fragmentos continentais e à formação dos oceanos modernos.

Quando Começou o Regime de Tectônica de Placas? A tectônica de placas mostra que crosta oceânica, de composição média basáltica, é formada continuamente nas dorsais médio oceânicas, enquanto que, ao mesmo tempo, nas zonas de subducção, crosta oceânica formada algum tempo antes é reciclada de volta para o manto. Dessa forma, a crosta oceânica tem um tempo de residência efêmero, da ordem de 200 milhões de anos, na superfície do planeta. Por outro lado, o magmatismo das zonas de subducção produz granitóides de vários tipos, nos arcos magnáticos, que acabam adicionando-se à crosta continental, vista a sua dificuldade de serem reciclados de volta para o manto pela sua densidade mais baixa. Esta é a forma pela qual a crosta continental aumenta continuamente a sua proporção relativa, no tempo geológico. Além disso, uma possibilidade alternativa de crescimento crustal é fornecida pelo magmatismo de origem mantélica, que ascende através das plumas, e pode acrescentar material tanto à crosta continental como à oceânica. Nesse último caso, ele pode eventualmente ser agregado aos continentes, nos processos chamados acrecionários. Como foi visto, este material é predominantemente basáltico, mas podem ocorrer em associação muitos produtos dele derivados, formados pelos diferentes processos de diferenciação magmática.

Magmatismo associado ao mobilismo horizontal da tectônica de placas, e magmatismo associado ao verticalismo das plumas mantélicas, são duas versões da mesma moeda, eles co-existem hoje em dia, e as evidências indicam que co-existiram durante quase todo o tempo geológico. As evidências acumuladas pela geoquímica, ao investigar o caráter das rochas magmáticas ao longo do tempo geológico (por exemplo, Condie & Pease 2008), indicam que no Arqueano, período em que o calor produzido no interior do planeta era 3-4 vezes maior do que o de hoje, predominava o regime verticalista, das plumas. No limite entre Arqueano e Proterozóico, há cerca de 2 bilhões de anos, a produção de magmas entre os dois regimes era semelhante, enquanto que mais recentemente, no Fanerozóico, o magmatismo ligado à tectônica de placas é largamente predominante.

Até o presente não foram encontradas na Terra rochas mais antigas do que 4030 milhões de anos, portanto não há evidências diretas a respeito dos regimes tectônicos primitivos. Por outro lado, pelo estudo dos meteoritos, acredita-se que o planeta Terra, em seu início, passou por uma fase com enorme quantidade de fase líquida, o modelo do “oceano de magma”. Isto quase seguramente ocorreu com a Lua, onde os anortositos de suas “highlands”, seriam o resultado de um processo global de diferenciação por flotação. Se isto ocorreu com a Lua, com mais razão teria ocorrido com o planeta Terra, de massa muito maior. Por outro lado, há indícios, no estudo dos minerais mais antigos encontrados

em rochas terrestres, os zircões do meta-conglomerado de Jack Hills, na Austrália, que há cerca de 4400 milhões de anos atrás já existiria uma crosta terrestre de composição granítica, além de água nas camadas superficiais do planeta, significando possivelmente uma superfície com baixa temperatura, podendo receber água líquida (Wilde et al., 2001). Na figura 2 se especula a existência de grande crescimento de crosta continental, por volta de 4400 Ma, e a existência de oceanos por volta de 4200 Ma. As rochas sedimentares mais antigas conhecidas remontam a 3800 Ma, indicando que já estavam em operação os processos superficiais de erosão e sedimentação.

Com a existência de oceanos, litosfera continental, terras emersas e com o planeta resfriando, haveria na Terra condições para o inicio do mecanismo de tectônica de placas, possivelmente com placas menores, mais finas e mais rápidas. Situação geológica em que tectônica acrecional similar à que ocorre hoje em dia, por exemplo, nos cinturões intra-oceânicos do Pacífico, foi descrita por Van Kranendonk et al. (2007) para o Craton de Pilbara, na Austrália, em rochas do Arqueano tardio, por volta de 2900 Ma. Na figura 2 indica-se também, de modo especulativo, o possível início deste regime por volta de 4100 Ma.

A dinâmica interna da Terra e seus impactos no clima e na vida do planeta A fisiografia da Terra, em que se salientam as cordilheiras elevadas que existem em todos os continentes, é continuamente atacada e desbastada pelos agentes da dinâmica externa. Se não houvesse a continua reposição do relevo, não haveria continentes, pois o fundo do oceano global estaria situado a volta de 2500 metros de profundidade. Felizmente existe no planeta o motor interno representado pelas correntes de convecção do manto, que condicionam a tectônica de placas, a qual modifica continuamente a topografia da superfície da Terra, repondo continuamente o relevo.

Entretanto, se por um lado a dinâmica interna proporciona a existência de vida nas terras emersas do planeta, ela se manifesta também de modo adverso, pelos desastres naturais relacionados com vulcanismo e terremotos, os processos geológicos mais evidentes que ocorrem de preferência nos limites entre as placas tectônicas (Tassanini, 2000). Esses fenômenos naturais potencialmente causadores de desastres, e que fazem parte da dinâmica do planeta, não podem ser impedidos. Entretanto, podem deixar de se tornar desastres, desde que sejam tomadas a tempo algumas medidas adequadas de prevenção. Já existem conhecimentos tecnológicos específicos. Além disso cresceu muito nos anos recentes a capacidade de defesa das sociedades devidamente instruídas e educadas nas técnicas de prevenção e segurança. Não são mais aceitáveis, no presente, as atitudes fatalísticas do passado em relação a desastres naturais, e os avanços do conhecimento devem ser ativados, em toda parte, para reduzir as possíveis perdas humanas e materiais. Para isso é importante, especialmente nos países mais vulneráveis a desastres, ensejar uma mudança de mentalidade, dando maior ênfase nas atividades de planejamento, prevenção, preparação, comunicação e educação específica para cada tipo de desastre, ao invés de limitar-se às atividades posteriores de reparação

dos danos e restauração das estruturas sociais.

Modificações da litosfera que ocorrem nos limites de placas tectônicas produzem cordilheiras, arcos magmáticos com vulcões ativos e uma atividade sismica importante. O conjunto de eventos pode alterar tanto a composição da atmosfera, devido às quantidades significativas de gases, do tipo H_2S , CO_2 , SO_2 e vapor de água, entre outros, que são exaladas, como também as condições climáticas que modificariam as condições de vida do planeta. Robock (2000) demonstrou que atividades vulcânicas podem afetar o sistema clima em diversas escalas de tempo, com reflexo na dinâmica da atmosfera, mas também na evolução da vida nos continentes. Por exemplo, os impactos climáticos significativos causados por atividades vulcânicas se dão através de injeção dos aerossóis e das cinzas emitidas, que atingem os níveis mais elevados da atmosfera, particularmente a baixas latitudes, para produzir uma dispersão em escala global, tal como ocorreu nas grandes explosões vulcânicas do Krakatoa, em 1883 (Stephen e Rampino, 1981), ou do Pinatubo, em 1991 (McCormick e Patrick, 1995), em que durante anos a circulação atmosférica foi afetada pelo material expelido pelos vulcões.

É difícil estimar o efeito da dinâmica interna do planeta e suas variações nas mudanças climáticas ocorridas na história da Terra. Especula-se que a situação da própria existência de supercontinentes e grandes oceanos, ou da situação de dispersão de fragmentos continentais pelas diferentes latitudes do planeta, como a que existe hoje em dia, teriam influência sobre o clima global. Dessa forma, poderia haver relações de causa e efeito entre as manifestações climáticas e a paleogeografia da superfície do planeta, em especial em relação aos extremos climáticos, ou seja, os períodos das glaciações maiores na história da Terra (Tardy e Roquin, 1998).

O sistema climático da Terra é constituído pela atmosfera, os oceanos, a superfície dos continentes e as geleiras. O planeta recebe mais energia solar nas baixas latitudes que nas regiões polares, no entanto esta energia é em parte transportada pelos ventos e correntes marinhas, o que atenua o gradiente térmico entre altas e baixas latitudes. Na escala do planeta, o fator que mais influencia o clima é a latitude, por causa de sua dependência direta com a insolação. No entanto, a distribuição latitudinal das zonas climáticas é modificada também por fatores específicos, como as correntes oceânicas e a altitude. Por outro lado, a geografia de continentes e oceanos, e especificamente a existência de grandes massas continentais em situação próxima dos pólos, pode influenciar o sistema climático de modo especial, ou seja ensejar o advento de épocas glaciais.

Flutuações climáticas ocorreram durante todo o tempo geológico e deveram-se principalmente ao equilíbrio entre a intensidade da radiação solar incidente e o efeito estufa, proporcionado pela quantidade de vapor de água, aliado a outros gases presentes na atmosfera. A figura 8, que reporta alguns dos principais eventos evolutivos do planeta Terra, na sua superfície, mostra que na primeira metade da história da Terra o efeito estufa era mais relevante do que hoje, por causa de manifestações vulcânicas com emanções gasosas em maior quantidade. O balanço entre o aumento progressivo da intensidade de radiação

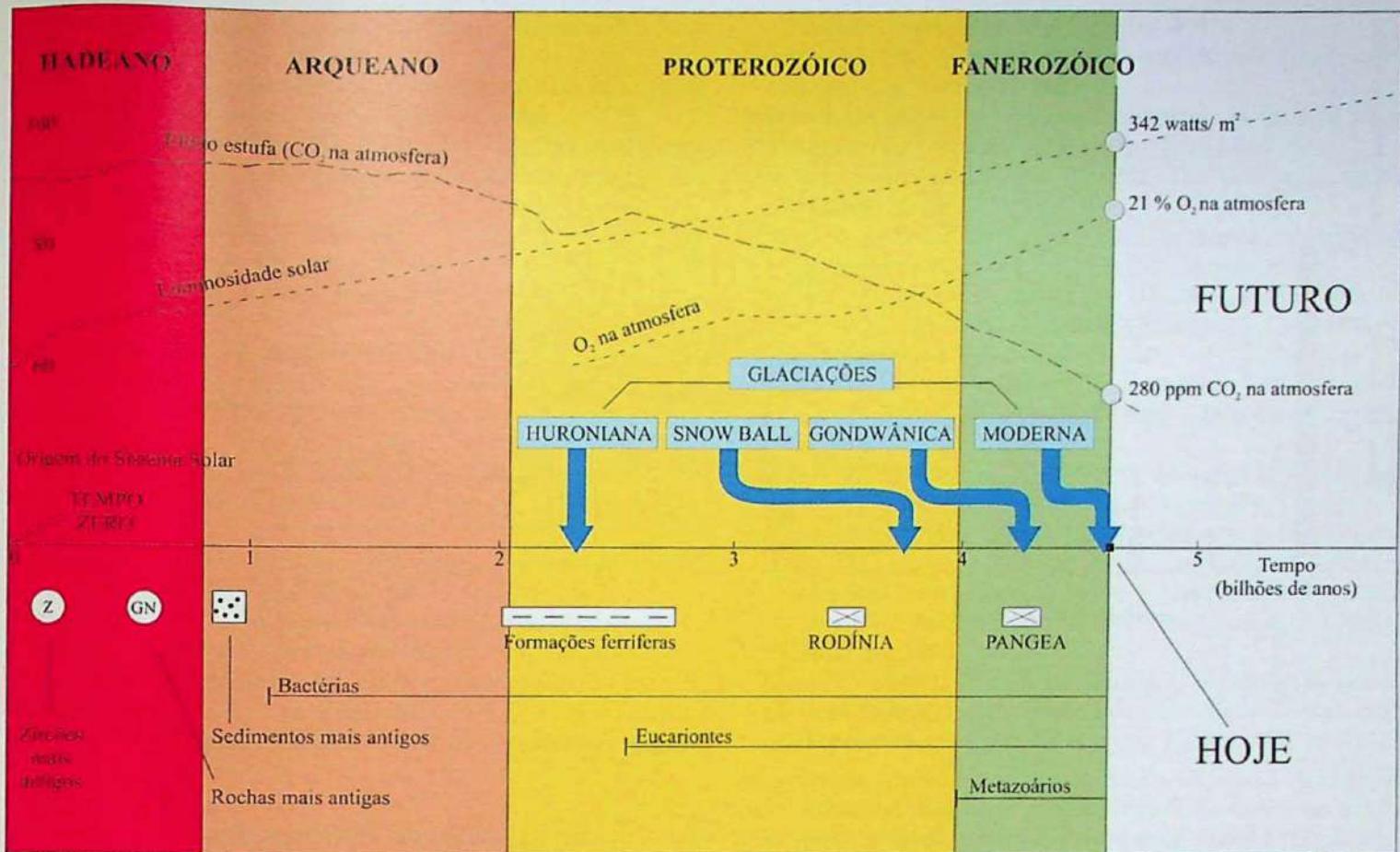


Figura 8: Esquema evolutivo para diversas feições maiores da história da Terra, em todo o tempo geológico: luminosidade solar; efeito estufa, oxigênio na atmosfera. Estão incluídos na figura os períodos principais de glaciação global, as épocas de existência dos supercontinentes globais Podínia e Pangea, e das principais formas de vida na Terra.

solar e a diminuição gradativa de CO₂ na atmosfera pela sua incorporação nos carbonatos marinhos permitiu, durante todo o tempo geológico, a partir da existência dos oceanos, uma temperatura da superfície da Terra compatível com a existência de água líquida e, portanto, da vida. Não há ocorrência clara de grandes glaciações nos primeiros dois bilhões de anos da Terra, como pode ser visto na figura 8. Os períodos quentes, caracterizados pela ausência de geleiras polares, dominaram portanto a maior parte do tempo geológico, em especial nas épocas mais antigas que 800 MA.

Na figura 8 verifica-se que os períodos frios, caracterizados pelo desenvolvimento de calotas glaciais que puderam atingir até latitudes médias ou baixas, duraram somente entre algumas dezenas e centenas de milhões de anos. O exemplo melhor conhecido de um período quente é o do Cretáceo médio, há cerca de 100 Ma, em que a temperatura global esteve excepcionalmente elevada. Na época não havia geleiras polares, e ocorreram as maiores transgressões marinhas do Fanerozóico; a maioria das massas continentais localizava-se em latitudes baixas ou médias, e uma tectônica ativa colocava grandes quantidades de CO₂ na atmosfera, intensificando o efeito estufa.

Houve pelo menos sete grandes períodos glaciais na história da Terra. No Proterozóico, em torno de 2 300 Ma, é registrada a primeira grande glaciação que afetou o planeta, denominada Huroniana. Entretanto é no período de transição entre o Proterozóico e o Fanerozóico, justa-

mente aquele que viu aparecer a vida multicelular, é que ocorreram três grandes glaciações: a Sturtiana (750-700 Ma), a Marinoana(630-610 Ma), que pode ter sido global (“Snowball Earth”, ou Terra Bola de Neve), atingindo latitudes tropicais e a Gaskiers (550-540 Ma). A figura 9 mostra a evolução da temperatura média da superfície da Terra ao longo do Fanerozóico , bem como a extensão latitudinal dos períodos glaciais ocorridos desde a glaciação Marinoana. Verifica-se que as temperaturas médias variaram gradualmente em todo o período, com dois mínimos pronunciados, um no Carbonífero, por volta de 300 Ma, e o outro correspondente ao Quaternário. A glaciação de 300 Ma é a chamada “Glaciação Gondwânica”, que afetou todos os continentes que fizeram parte do supercontinente de Gondwana, o qual na época constituía parte da Pangea, e localizava-se justamente em latitude polar. Finalmente, a última das glaciações do planeta, que perdura até hoje, começou há cerca de 15 milhões de anos no hemisfério sul, onde se localiza o continente Antártico. Nos últimos dois ou três milhões de anos da história da Terra registraram-se com precisão vários avanços e recuos das geleiras, muito bem documentados pelos depósitos glaciais do hemisfério norte. Pelas evidências, a glaciação do Quaternário apresentou uma dezena de oscilações maiores, e cerca de quarenta oscilações menores. Hoje estamos vivendo o mais recente episódio interglacial dessa glaciação, iniciado há cerca de 10 000 anos.

As causas das grandes flutuações climáticas, e espe-

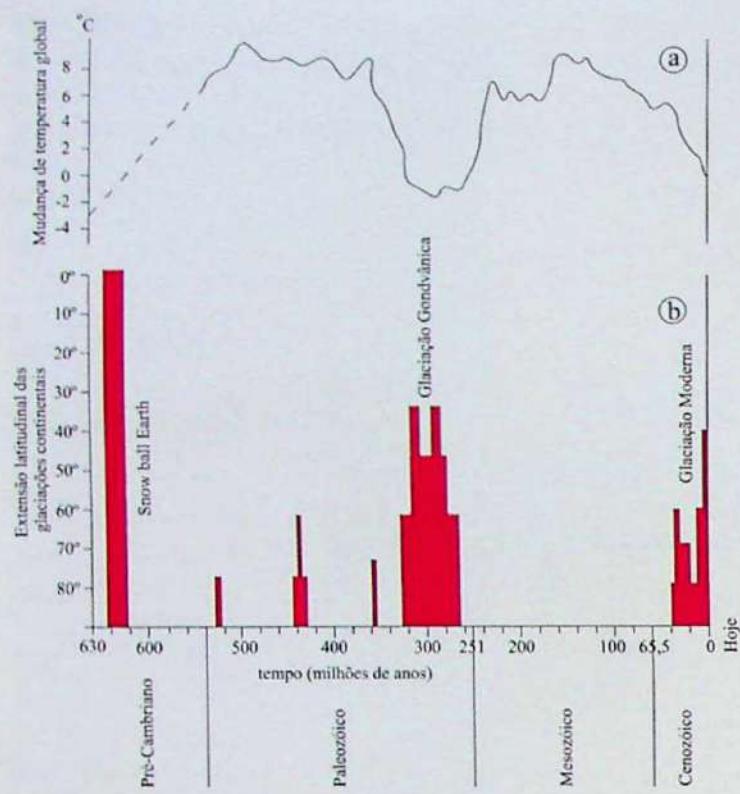


Figura 9: Evolução da temperatura média da superfície da Terra ao longo do Fanerozóico, e extensões latitudinais das glaciações globais principais ocorridas desde a "Snow Ball Earth" (glaciação Marinoana).

cialmente dos resfriamentos que conduzem às glaciações ainda não estão bem compreendidas, e normalmente são associadas a variações nos padrões de circulação oceânica, e em particular ao transporte de calor para as latitudes polares. Por outro lado, a situação das massas continentais e do relevo, e outras feições condicionadas à atuação da dinâmica interna, podem ser importantes. Como exemplo, o resfriamento global ocorrido recentemente e que levou o planeta à glaciação do Quaternário pode estar associado ao levantamento do platô tibetano nos Himalaias, iniciado há aproximadamente 50 Ma, que modificou sensivelmente a circulação atmosférica global.

As idades das Grandes Províncias Magmáticas têm coincidido, aproximadamente, com os mais importantes períodos de extinção de espécies durante a história geológica da Terra (Courtillot, 1999). Na figura 10 os exemplos mais marcantes da associação entre formação de LIPs e grandes extinções de formas de vida são o evento chamado K-T do final do Cretáceo (70 Ma) associado com o vulcanismo "Deccan" na Índia, a extinção do Jurássico (180 Ma) associada com a formação dos basaltos do Karoo no sul da África e a extinção de plantas e animais do Permiano (250 Ma) com a província Siberiana de derrames de basalto. Por isto pensa-se que a formação dessas províncias teria um efeito importante sobre a vida do planeta, mudando as condições ambientais na escala global. Durante a formação das LIPs seria liberada uma grande quantidade de gases tóxicos para os seres vivos, incluindo por exemplo SO_2 , Cl, F, NH_4 , etc, que formariam, entre muitos outros compostos, ácido sulfúrico na atmosfera, provocando chuvas ácidas, que por sua vez ensejariam o

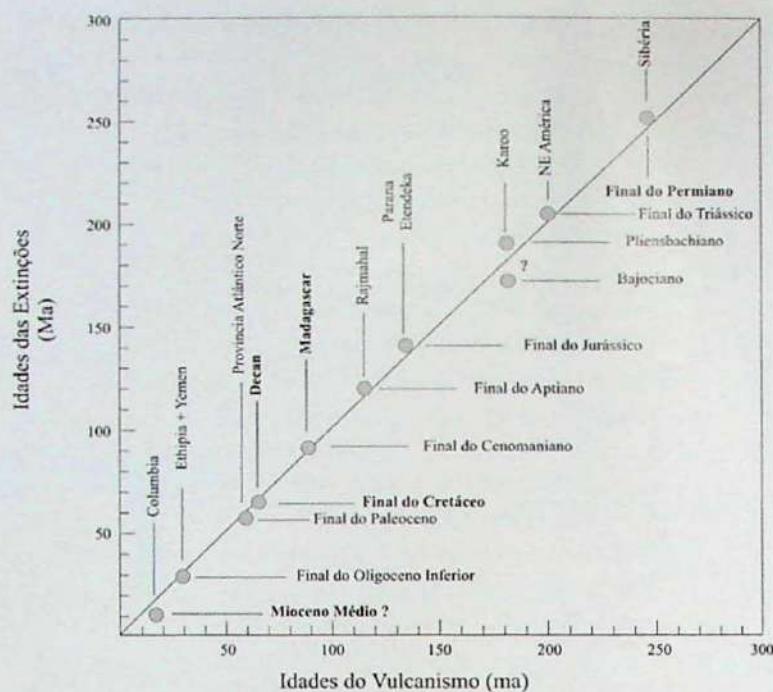


Figura 10: Diagrama de correlação entre as épocas de formação das Grandes Províncias Magmáticas e grandes extinções de formas de vida, no Meso-Cenozóico. (Courtillot, 1999)

aumento de lixiviação de nutrientes dos solos, inviabilizando a sobrevivência de muitas espécies.

Embora muito afastado da superfície da Terra, o núcleo terrestre também pode ter a sua importância para a vida no planeta, em especial na forma em que a dinâmica do núcleo externo fluido, onde se origina o campo geomagnético, pode ter afetado a evolução biológica no curso do tempo geológico. Como já foi descrito, o campo geomagnético, formador da magnetosfera, é um escudo que protege o planeta do impacto de raios cósmicos e vento solar. Entretanto, possui grande variabilidade em sua intensidade, dada a existência das reversões de polaridade, que nos últimos períodos da história da Terra têm ocorrido com freqüência da ordem de uma em cada milhão de anos. O modelo idealizado para a ocorrência de reversão é uma mudança nas condições de movimentação do material fluido no núcleo externo, e a decorrente diminuição da intensidade do campo até anular-se, para recomeçar um novo ciclo com polaridade invertida, mas com geometria sempre dependente do eixo de rotação do planeta. Especula-se que, nos períodos relativamente curtos de intensidade nula ou muito baixa, a superfície da Terra perderia seu escudo protetor e seria invadida por radiações incidentes em escala muito maior, ensejando uma aceleração na taxa de mutações nas diferentes espécies expostas, e portanto uma aceleração nos processos de seleção natural e na velocidade de aparecimento de espécies novas.

Referências

- Anderson, D.L. 1989 – Theory of the Earth – Blackwell Scientific Publications, 366p.
 Condie, K.C. 1998 – Episodic continental growth and super-

- continents: A mantle avalanche connection?, *Earth Planetary Science Letters*, 163: 97-108.
- Condie, K.C. 2001 – Mantle Plumes and their Record in Earth History. – Cambridge University Press, 306p.
- Condie K.C. & Pease V. 2008. When Did Plate Tectonics Begin on Planet Earth. The Geological Society of America, Special Paper 440: 294 pp.
- Cordani U.G & Sigolo, J.B.-. 1997. – Composição e estrutura interna de Marte – In: O Massambani & M.S.M. Mantovani –(Eds.) : Marte: Novas Descobertas, IAG USP, Cap.4 – p 121-138.
- Courtillot V. 1999. Evolutionary Catastrophes: the Science of Mass Extinctions: Cambridge University Press, 173 pp.
- Dewey, J.F. 2007 – The secular evolution of plate tectonics and the continental crust: An outline. In: Hatcher, R.D.Jr, Carlson, M.P., McBride, J.H. & Martínez-Catalan, J.R. (Eds) , 4-D Framework of Continental Crust, GSA Memoir 200: 1-7.
- Le Pichon X. 1968. Sea-floor spreading and continental drift. *Journal of Geophysical Research*, 73, 3661-3687.
- Mahoney J.J. & Coffin M.F. (Eds.) 1997. Large Igneous Provinces: continental, oceanic and planetary flood volcanism. *Geophysical Monograph* 100, American Geophysical Union: 438 pp.
- McCormick M. Patrick E. 1995. Atmospheric effects of the Mt Pinatubo eruption. *Nature* 373: 399-404.
- Robock A. 2000. Volcanic eruptions and climate: *Reviews of Geophysics*. 38: 2, 191-219.
- Rogers,J.J.W. 1996 –A history of continents in the past three billion years. - *Journal of Geology*, 104: 91-107.
- Stephen S. & Rampino M. R. 1981. The 1883 eruption of Krakatau. *Nature*, 294: 699-704.
- Tardy, Y & Roquin C. 1998. Dérive des continents, Paléoclimats et altérations tropicales, Editions BRGM, 473 pp.
- Tassinari C.C.G. 2000. Tectonica Global. In: W. Teixeira, M.C.M Toledo, T. Fairchild & F. Taioli (Eds): Decifrando a Terra, Oficina de Textos, , p.: 98-112.
- Teixeira, W., Toledo, M.C.M. de, Fairchild, T.R. & Taioli, F.(Org.), 2000 – Decifrando a Terra. – Oficina de Textos, São Paulo, 568 p.
- Uyeda S. 1971. New view of the Earth. *Moving Continents and Moving Oceans*. W. H. Freeman and Company, 217 pp.
- Van Kranendonk, M.J., Smithies, R.H., Hickman, A.H & Champion, D.C. – 2007 – Secular tectonic evolution of Archean continental crust: Interplay between horizontal and vertical processes in the formation of the Pilbara Craton, Australia. –*Terra Nova*, 19: 1-38.
- Wilde S., Valley J., Peck W.H., Grahan C.M. 2001. Evidence from detrital zircons for the existence of continental crust and oceans on the Earth 4.4 Gyr ago. *Nature*, 409: 175-178.

Solo e ambiente

Adolpho José Melfi¹ e Célia Regina Montes²

*1 - Professor Titular do Departamento de Ciência do Solo, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz,
Universidade de São Paulo.*

2 - Professora Doutora do Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo.

*1 e 2 - Núcleo de Pesquisa em Geoquímica e Geofísica da Litosfera da Universidade de São Paulo,
NUPEGEL-USP.*

Solo e ambiente

Adolfo José Melfi e Célia Regina Montes

Resumo A formação do solo depende da interação entre litosfera, hidrosfera, atmosfera e biosfera. Além de suas múltiplas funções na agricultura, engenharia, geologia, arqueologia, por exemplo, o solo desempenha um papel fundamental para a compreensão dos processos que afetam o meio ambiente, sejam eles naturais ou antrópicos. Sua formação reflete a influência do meio ambiente, o qual por sua vez, é por ele influenciado.

O solo é um corpo vivo, ativo e em constante evolução. Ele nasce e, com o tempo, atinge a maturidade e caminha para a senilidade. Neste percurso, suas propriedades químicas, físicas e físico-químicas se degradam, lenta ou rapidamente, dependendo da intensidade das atividades sobre ele desenvolvidas pelo homem. A degradação do solo provoca modificações no meio ambiente, que podem afetar de maneira marcante a qualidade de vida sobre a Terra. Para evitar ou minimizar os efeitos nocivos da degradação dos solos para o homem e para o meio ambiente, é importante que seu estudo seja feito com um enfoque na sua dinâmica e evolução, que descreva e caracterize seu estado atual de organização e funcionamento na paisagem, que irá permitir não só reconstruir sua história, mas, também, prever sua evolução futura natural ou sob o impacto de ações antrópicas.

Palavras-chave: Solo e ambiente, Intemperismo e Pedogênese, Distribuição dos solos, Degradação dos solos, Sistemas de solos

Abstract *SOIL AND ENVIRONMENT.* The soil formation depends on the interactions between lithosphere, hydrosphere, atmosphere and biosphere. Beside its multiple functions, for example in agriculture, engineering, geology, archaeology, the soil plays a key role for the understanding of the natural or anthropic processes which affect the environment. The soil reflects the environment in which it was formed, as well as it acts upon the environment.

The soil is a living body, activated and in permanent evolution. It arises then, with time, reach maturity and progress towards senescence. Along this pathway, its physical, chemical and physicochemical properties degrade quickly or slowly, depending on the intensity of the activities developed by man over it. The soil degradation modify the environment, which can durably affects the life quality on our planet. In order to minimize the harmful effects of soil degradation on mankind and environment, the soil studies have to be conducted focusing on how it works and how it evolves. They need to describe and characterize the present-day organization and dynamics, so as to allow not only the reconstruction of its history, but also the prevision of its future evolution under natural or anthropic influences.

Keywords: Soil and Environment, Weathering and Pedogenesis, Soils distribution, Soils degradation, Systems of soils

INTRODUÇÃO

A importância do estudo dos solos As rochas que ocorrem na superfície dos continentes apresentam-se, freqüentemente, recobertas por uma fina formação, em geral argilosa, friável, móvel e que serve de suporte para o crescimento da vegetação, seja ela natural ou cultivada. Esta formação, cuja espessura pode variar de alguns poucos centímetros, em regiões de clima seco, semi-árido, até poucas centenas de metros nas zonas equatoriais úmidas do globo, é denominada solo.

O solo é um meio complexo, mineral e orgânico, cuja gênese resulta da interação entre a litosfera e as demais esferas que ocorrem na superfície do planeta – hidrosfera, atmosfera e biosfera. A interação com a biosfera, por meio da ação da matéria orgânica, dá especificidade ao solo e é a responsável pela sua diferenciação do mundo mineral.

Não é fácil definir solo, pois sendo um material complexo e que pode desempenhar inúmeras funções apresenta necessariamente conceitos diferentes em razão de sua utilização. Assim, o solo não é entendido da mesma maneira pelo agricultor, pelo engenheiro civil, pelo geólogo, pelo engenheiro sanitário, pelo arqueólogo, etc.

Porém, para as Ciências da Terra, o solo fica perfeitamente definido e caracterizado como sendo um “*corpo natural, organizado, que ocorre na superfície do planeta, produto resultante das transformações químicas, físicas e mineralógicas, sofridas pelas rochas, na interface litosfera, hidrosfera, atmosfera e biosfera*”.

O solo é um recurso natural não renovável na escala humana e constitui um dos principais componentes da biosfera continental, por representar um meio vivo ativo e que se encontra em constante evolução. Ele desempenha, neste espaço, onde o homem vive e realiza a maior parte de suas atividades, um importante papel de interface dos processos naturais ou antrópicos que afetam o meio ambiente.

Apesar de ser fundamental para a existência da vida nos continentes, este importante recurso natural é ainda pouco conhecido, sobretudo no que diz respeito ao seu funcionamento, mecanismo essencial para a compreensão da sua evolução espacial e temporal quando impactado pelas forças naturais ou pela ação do homem. Sua importância reside no fato de desempenhar diferentes funções, todas elas capitais para a existência e qualidade da vida na superfície do planeta. Sua função nos primórdios da

nossa civilização era a de produzir alimentos. Esta função continua sendo extremamente importante, especialmente agora, quando existe uma demanda crescente por alimentos, motivada, não só pelo aumento populacional, mas também pelo maior acesso que a população tem para os alimentos. Entretanto, ao lado da função de produção de alimento, o solo é cada vez mais solicitado a desempenhar outros papéis, como por exemplo, o de produzir fibras e biocombustíveis, o de fornecer materiais para a construção civil, o de servir de base para construção de estradas e grandes obras de engenharia, o de ser utilizado como filtro biológico para a depuração de efluentes, o de ser utilizado como corpo receptor e armazenador de resíduos urbanos, da indústria e da agricultura.

A falta de um conhecimento mais profundo sobre o funcionamento do solo, aliado ao fato dele estar sendo abusivamente utilizado em todos os setores acima mencionados, vem provocando, cada vez mais intensamente sua degradação. Lal e Stewart (1990) afirmam que a degradação dos solos, condiciona duas ameaças principais para o planeta Terra. A primeira diz respeito à redução da capacidade produtiva do solo, enquanto a segunda, mais ampla, pode afetar o clima global, através de alterações dos ciclos do carbono, nitrogênio e enxofre, por exemplo. Desta forma, a degradação do solo pode afetar diretamente a estrutura da humanidade.

Qualquer tipo de solo quando submetido a ações que tendem a modificar suas propriedades físicas, químicas e biológicas pode sofrer degradações. Se nas regiões frias e temperadas do globo as degradações atingem, principalmente o nível da produção agrícola, nas zonas tropicais e equatoriais as degradações afetam, igualmente, o meio ambiente. Nestas zonas a cobertura de solos é bem mais espessa, representando sistemas muito evoluídos, empobrecidos em elementos nutritivos, frágeis, sofrendo de forma mais acentuada a ação das atividades desenvolvidas pelos homens, cujos resultados podem, muitas vezes, provocar degradações importantes que os levam à destruição. Entretanto, ressalta-se que as degradações nas regiões tropicais ocorrem também naturalmente, pela atuação, durante um lapso de tempo muito grande, dos próprios agentes de formação do solo (altos índices pluviométricos e temperaturas elevadas).

Para impedir ou minimizar os efeitos deletérios dessas transformações é fundamental estudar o solo sob o ponto de vista de sua dinâmica e evolução, descrevendo e caracterizando seu estado atual de organização (anatomia do solo) e seu funcionamento (fisiologia do solo) no modelo terrestre, o qual irá permitir não só reconstituir sua história, mas também prever sua evolução futura.

Desta forma, os modernos estudos de solo devem ser realizados com o duplo objetivo de permitir a exploração racional desse recurso finito e de promover uma gestão ambiental sustentável e compatível com as necessidades e exigências da sociedade contemporânea. Enfim, os estudos devem caracterizar e identificar os mecanismos e processos elementares envolvidos na formação e na transformação (degradação) desse ecossistema, reconhecido, em especial nos meios tropicais, por sua extrema fragilidade.

DA ROCHA AO SOLO

Intemperismo e pedogênese: dois processos que agem na formação do solo Dois processos ligados à dinâmica externa da Terra e, atuando associados, são responsáveis pela formação dos solos: intemperismo e pedogênese.

Intemperismo é o processo que promove modificações na constituição física (desagregação) e química (decomposição) das rochas aflorantes na superfície dos continentes. Qualquer tipo de rocha seja ela magmática, metamórfica ou sedimentar, desde que exposta à ação do intemperismo sofre transformações que levam à formação de um material que se encontra em equilíbrio com as condições existentes no meio ambiente. Este material, denominado *saprolito* ou *regolito* ou ainda *alterita*, forma um manto de alteração ou de intemperismo que recobre, de forma quase contínua, as rochas aflorantes na superfície da Terra. Sua espessura, bastante variável, depende da posição ocupada no relevo e da zona climática onde ele se encontra. A caracterização de suas propriedades é realizada a partir do estudo do perfil de alteração, que corresponde a uma determinada secção vertical do manto de intemperismo, desde a rocha fresca até o solo (figura 1).

Dois tipos de intemperismo que, em geral, atuam em conjunto são responsáveis pelas modificações sofridas pelas rochas: *intemperismo físico* e *intemperismo químico*.

O intemperismo físico é o processo que provoca a desagregação das rochas, isto é, transforma uma rocha, geralmente, dura e compacta em um material fragmentado e friável. Este tipo de intemperismo modifica a estrutura

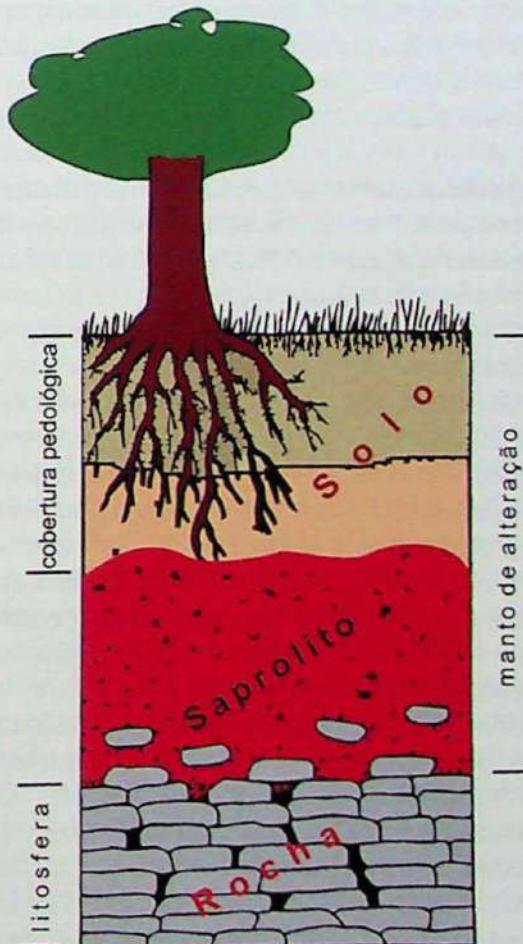


Figura 1. Perfil de alteração da rocha

da rocha original sem, contudo modificar sua composição química e mineralógica.

O intemperismo físico se manifesta pela fragmentação da rocha mediante a esforços físicos causados: (i) pela variação diurna ou sazonal da temperatura, a qual provoca contrações e dilatações de seus constituintes minerais destruindo sua coesão; (ii) pelo aumento do volume da água situada no interior de fraturas e fissuras das rochas por efeito do congelamento; (iii) pelo aumento da pressão derivada da cristalização de sais existentes em soluções aquosas no interior de fraturas das rochas; (iv) pela expansão das rochas, consequência do alívio de carga produzido pela erosão do material sobreposto e, (v) pela pressão provocada pelo crescimento de raízes no interior de fraturas das rochas.

O intemperismo químico é o processo dominante na alteração das rochas na superfície do planeta e na formação dos solos. Ele age por meio de reações que ocorrem entre a água da chuva que percola as rochas e os minerais que as constituem, promovendo suas dissoluções. Sua ação é facilitada pela prévia atuação do intemperismo físico que abre o caminho para uma maior interação entre as soluções de alteração e os minerais formadores das rochas.

Na dissolução dos minerais, os constituintes mais solúveis são transportados pela água em solução (fase solúvel), enquanto que os mais resistentes permanecem no local, concentrando-se e formando a fase residual. Nesta fase encontram-se os minerais primários menos susceptíveis à ação do intemperismo, herdados da rocha original e os minerais secundários formados durante a atuação do processo intempérico. Entre os minerais primários residuais, o quartzo é um dos mais comuns, podendo aparecer em qualquer fração granulométrica, enquanto que entre os secundários, concentrados na fração argila, os mais comuns são os argilominerais, os óxidos e hidróxidos.

Reações do intemperismo químico As principais reações que ocorrem entre as soluções aquosas superficiais e os minerais formadores das rochas são: hidratação, dissolução, oxidação e hidrólise.

As três primeiras são reações específicas para alguns minerais ou grupos de minerais. Assim, a hidratação se manifesta em minerais que admitem a entrada da molécula de água em sua estrutura cristalina, como é o caso da anidrita (CaSO_4) que se hidrata formando o gipso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$); a dissolução ocorre em rochas constituídas por minerais altamente solúveis, como certas rochas salinas (evaporitos, calcários, etc.) e a oxidação afeta minerais constituídos por elementos que podem se apresentar em mais de um estado de oxidação, como por exemplo, minerais contendo ferro (biotita, anfibólio, etc.).

A hidrólise, ao contrário, age sobre os principais minerais formadores das rochas, os silicatos. Neste caso a água se ioniza, agindo por meio de seus íons H^+ e OH^- . O íon H^+ entra na estrutura dos silicatos deslocando para a solução, especialmente os cátions alcalinos (Na^+ e K^+) e alcalinos terrosos (Ca^{2+} e Mg^{2+}). A estrutura do mineral na interface sólido/solução entra em colapso, é rompida e libera para a solução Si e Al. Estes elementos, menos móveis que os alcalinos e alcalinos terrosos, podem se recombinar for-

mando minerais secundários silicoaluminosos, como por exemplo, os argilominerais.

A hidrólise, reação que melhor caracteriza o intemperismo, pode apresentar diferentes tipos, que variam em função do pH do meio e do fluxo das soluções no contato com as rochas em vias de alteração. De acordo com o pH, a hidrólise pode ser normal (hidrólise), ácida (acidólise) e alcalina (alcalinólise). Estes três mecanismos podem ser totais ou parciais de acordo com o fluxo de soluções, no caso da hidrólise, e com o pH na acidólise e alcalinólise.

A hidrólise é o mecanismo dominante na superfície do planeta, atuando nas zonas temperadas quentes, tropicais e equatoriais, onde o pH das soluções que percolam as rochas possuem valores entre 5 e 9. De acordo com o fluxo das soluções a hidrólise pode ser total (fluxo intenso), quando os íons alcalinos e alcalinos terrosos e a sílica são eliminados em solução, ocorrendo no manto de alteração concentração residual de alumínio, o qual pode se precipitar na forma de gibbsita. Em condições de fluxos menos intensos a hidrólise pode ser parcial; neste caso a sílica não é totalmente eliminada, reagindo com o alumínio para formar silicatos de alumínio (argilominerais). Em função do grau de eliminação dos alcalinos e alcalinos terrosos pode haver formação de argilominerais ditos 1:1 (tipo caolinita; argilominerais formados por uma folha de tetraedros de sílica associada a uma folha de octaedros de alumínio), quando a eliminação for total, ou formação de argilominerais 2:1 (tipo esmectita; argilominerais cuja estrutura fundamental é constituída por uma folha de octaedros de alumínio envolvidas por duas de tetraedros de sílica.), quando a eliminação for parcial.

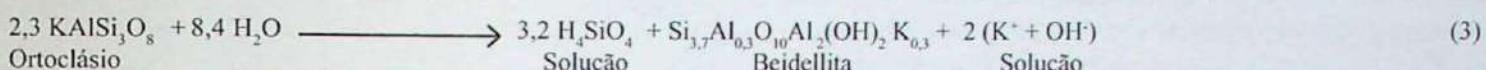
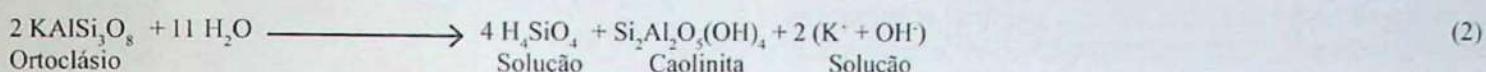
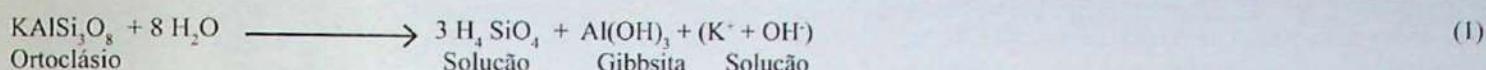
Na tabela 1 estão representadas as reações que exemplificam os diferentes graus da hidrólise que ocorrem no intemperismo do ortoclásio, um dos minerais mais comuns das rochas aflorantes na superfície da Terra.

Na hidrólise total, (reação 1, tabela 1) 100% da sílica e do potássio são eliminados, restando no material intemperizado somente o hidróxido de alumínio (gibbsita), insolúvel na faixa de pH entre 5 e 9. Este mecanismo é denominado *alitização*. Neste tipo de hidrólise o ferro, presente nos minerais primários, também se concentra na forma de óxidos.

Na hidrólise parcial (reação 2, tabela 1) o potássio é totalmente eliminado, enquanto que somente parte da sílica é eliminada (66%). O mineral secundário encontrado no material de alteração é a caolinita (mineral 1:1) e o mecanismo é denominado *monossialitização*. Já na hidrólise parcial, representada pela reação 3, a eliminação de sílica é menos intensa, (apenas 46%) e a de potássio é de 87%. Neste caso, o mineral secundário formado é a esmectita (mineral 2:1) do tipo beidellita. O mecanismo é denominado *bissialitização*.

A hidrólise ácida (acidólise) é o mecanismo característico das regiões frias, boreais do planeta, onde a evolução da matéria orgânica é lenta e leva à formação de ácidos orgânicos hidrossolúveis que fornecem um caráter ácido e complexante às soluções de alteração. Os valores de pH são inferiores a 5, faixa onde ferro e alumínio podem ser solubilizados e eliminados, seja na forma iônica (Fe^{3+} e Al^{3+}), seja complexados. Na acidólise, os diferentes graus

Tabela 1. Principais reações envolvidas nos diferentes graus da hidrólise de um feldspato potássico (ortoclásio) (Pédro, 1984).



não dependem do fluxo das soluções, como no caso da hidrólise normal, mas sim dos valores do pH.

Na acidólise total as soluções de intemperismo possuem valores de pH inferiores a 3. Nestas condições todos os elementos constituintes dos silicatos passam para a solução e são eliminados, não havendo formação de minerais secundários. No manto de intemperismo são encontrados apenas minerais primários resistentes, como por exemplo, o quartzo. O mecanismo de alteração é a *podzolização* (reação 1, tabela 2).

Na acidólise parcial, os valores de pH se situam entre 3 e 5 e nestas condições a eliminação do alumínio não é completa, podendo haver combinação com a sílica para a formação de argilominerais 2:1 aluminosos. O mecanismo de alteração envolvido é a *aluminossilitização*. Retomando o exemplo do ortoclásio tem-se (reação 2, tabela 2):

Na reação 1 da tabela 2, a acidólise total não leva à formação de minerais secundários, enquanto que na acidólise parcial (reação 2) ocorre a formação de um argilomineral 2:1, mas como o meio é ácido os sítios de troca são preenchidos pelo alumínio (beidellita aluminosa) e não por cátions básicos, como na bissialitização normal (reação 3 da tabela 1).

A hidrólise alcalina (alcalinólise) é um mecanismo pouco representado na superfície do globo, ocorrendo, de forma não contínua, em regiões de climas áridos, onde as soluções de intemperismo possuem reagentes marcadamente básicos. Os valores de pH do meio são superiores a 9,6, sendo suficientemente alcalinos para produzir a dissociação do H_4SiO_4 para $H_3SiO_4^-$ e fazer com que o alumínio apareça, pelo menos parcialmente, como $Al(OH)_4^-$. De acordo com os valores de pH pode-se ter alcalinólise total ou parcial (tabela 3).

Alcalinólise total ocorre quando o meio é suficientemente alcalino (valores de pH superiores a 11,3) para que, tanto a sílica, quanto o alumínio apareçam em solução na forma aniónica. Trata-se de um mecanismo comparável a acidólise total, pois sua atuação não permite a formação de minerais secundários. É o mecanismo denominado *solodizacão* (reação 1, tabela 3).

Alcalinólise parcial ocorre quando o meio não é suficientemente alcalino para que todo o alumínio esteja na forma aniónica. Ela ocorre quando as soluções apresentam valores de pH entre 9,6 e 11,3. Nos valores mais baixo de pH, ao redor de 9 e 10, a alcalinidade é nítida, porém os meios são pouco concentrados e o mecanismo que se desenvolve

é semelhante a *bissialitização*, com formação de argilominerais 2:1 (esmectita). Quando os valores de pH são mais elevados, superiores a 10, e os meios são mais concentrados o alumínio na forma aniónica pode reagir com a sílica para formar um tectossilicato do tipo analcita. O mecanismo é denominado *zeolitização* (reação 2, tabela 3).

Fatores que controlam o intemperismo das rochas O saprolito, material que constitui o manto de alteração possui características granulométricas, mineralógicas e químicas variáveis em função do tipo de intemperismo predominante (físico ou químico) e dos fatores que controlam sua ação. São fatores do intemperismo: (i) a rocha original (ii) o clima (iii) o relevo (iv) os organismos e (v) o tempo.

Rocha original – A rocha constitui um fator passivo no intemperismo. Ela reage à ação do clima, dos organismos e do tempo em função de sua composição mineralógica, textura e estrutura. A composição mineralógica da rocha interfere pelo fato de que os minerais apresentam suscetibilidade diferentes à alteração. Assim, os silicatos que constituem uma rocha granítica são mais resistentes que o carbonato de cálcio (calcita) que constitui o calcário. Este comportamento diferencial afeta a composição dos materiais de alteração, que serão enriquecidos em minerais mais resistentes, como por exemplo, o quartzo e a muscovita e empobrecidos ou desprovidos de minerais facilmente alteráveis, como por exemplo, piroxênios e olivinas. A textura e estrutura das rochas influenciam o intemperismo, na medida em que controlam a penetração de água nas fissuras e fraturas das rochas, dificultando ou facilitando o contato da água com os minerais em via de alteração. Assim, rochas compactas e com texturas grossas alteram-se mais lentamente que rochas menos compactas e de texturas finas.

Clima - constitui um fator ativo, de importância fundamental na formação do saprolito. É ele que condiciona a repartição dos diferentes tipos de alteração na escala do globo e posteriormente do próprio solo. Inicialmente, sua importância concentra-se na determinação do tipo e da intensidade do intemperismo, que dependem fundamentalmente da água (chuva). Dois elementos são essenciais: a qualidade da água, função da temperatura do meio (define a quantidade de CO_2 dissolvido nas soluções de ataque) e a quantidade de água suscetível de circular nos horizontes de alteração, que depende especialmente da precipitação.

São esses dois parâmetros que definem os diferentes tipos de interação, que depende especialmente da precipitação.

Tabela 2. Principais reações envolvidas nos diferentes graus da acidólise de um feldspato potássico (ortoclásio) (Pédro, 1994).

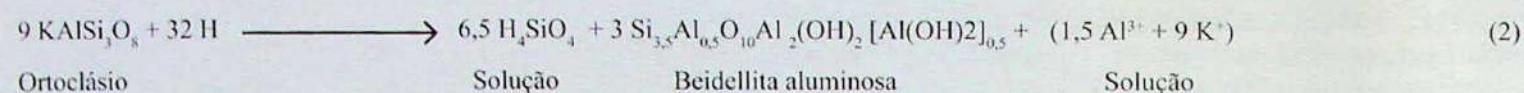
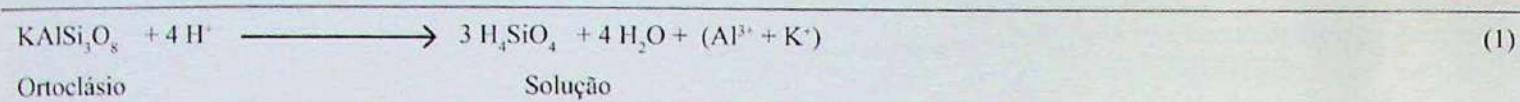
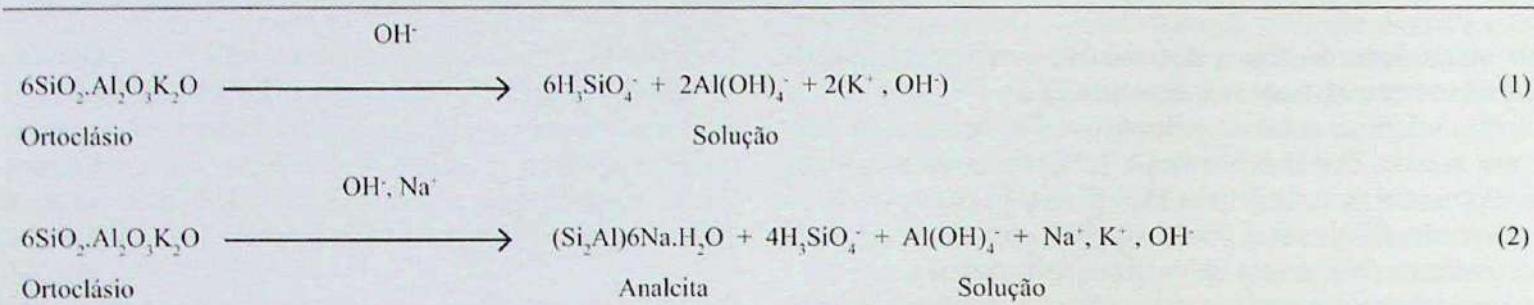


Tabela 3. Principais reações envolvidas na nos diferentes graus da alcalinólise de um feldspato potássico (ortoclásio) (Pédro, 1994).



pos de reações hidrolíticas encontradas no intemperismo, as quais irão controlar a formação de minerais secundários específicos (argilominerais, óxidos e hidróxidos e carbonatos) nos mantos de alteração. Assim, o clima define não somente a intensidade da alteração, mas também o tipo de mecanismo envolvido.

As coberturas de alteração podem ser caracterizadas pelos seus minerais constituintes e, sendo os argilominerais onipresentes em, praticamente, todos os perfis de alteração do globo, é possível por meio destes minerais separar cinco grandes domínios associados às diferentes zonas climáticas.

Nas regiões continentais do globo, onde inexiste água líquida, a alteração química das rochas não se produz e consequentemente não ocorre formação de argilominerais. Correspondem às zonas recobertas permanentemente por gelo (10% das terras emersas) e as zonas áridas, dos desertos absolutos, onde as rochas e sedimentos afloram diretamente na superfície (4% das terras emersas).

Nos restantes 86%, a existência de água líquida promove a alteração química das rochas.

Nas zonas frias do globo, com vegetação microtérmicas, higrófitas e pobres em nitrogênio (coníferas, musgos, etc.), a lenta degradação da matéria orgânica forma compostos hidrossolúveis, ácidos capazes de complexarem ferro, alumínio e outros metais dos minerais das rochas eliminando-os do perfil de alteração. Neste domínio não há formação de minerais secundários, permanecendo "in situ" o quartzo, como mineral residual da alteração e matéria orgânica. É o domínio da hidrólise ácida (acidólise), que domina a zona boreal, perfazendo 16% da área continental.-

Nas zonas temperadas, estépicas e semi-áridas o manto de alteração é constituído, predominantemente, por argilominerais do tipo 2:1 (esmectita). É o domínio da bissialitização, que ocupa 39% da superfície continental do planeta. Nas zonas com climas bem mais secos, peridesérticos

a bissialitização é acompanhada por fortes acumulações de carbonatos, formando geralmente crostas endurecidas e contínuas. É o domínio da bissialitização, associada a uma alcalinização mais ou menos pronunciada. Esta zona tem pequena expressão geográfica, não sendo possível representá-la cartograficamente na escala do planeta.

Nas zonas com climas tropicais, com estação úmida e curta estação seca alternadas, as alterações são constituídas majoritariamente por argilominerais 1:1 (caolinita). É o domínio da monossialtização, onde comumente os argilominerais 1:1 são acompanhados por óxidos e hidróxidos de ferro do tipo goethita e hematita e de alumínio, do tipo gibbsita. Esta zona perfaz 18% da superfície do globo. Nas zonas onde a estação seca é mais marcada, os compostos de ferro podem formar acumulações endurecidas do tipo carapaças ou couraças ferruginosas.

Nas zonas equatoriais muito úmidas, as alterações com caolinita são acompanhadas por expressivas quantidades de hidróxidos de alumínio (gibbsita). É o domínio da alitização, que recobre 13% da superfície continental.

A representação esquemática desses grandes domínios pode ser visualizada na figura 2. Ressalta-se, porém que a distribuição real é bem mais complicada, devido a existência de rochas particulares e de relevos terrestres que podem definir microclimas diferenciados dentro de zonas climáticas.

Relevo - atua sobre as condições hídricas do meio (velocidade de escoamento vertical e lateral da água), sobre as condições de transporte de materiais, por ação da gravidade e água (erosão) ou sobre as condições climáticas (temperatura, exposição dos materiais em relação ao sol).

As condições hídricas e de transporte de materiais estão ligadas às vertentes, cujas inclinações desempenham um importante papel no fluxo das soluções e na relação escoamento/infiltração. A inclinação das vertentes pode definir a quantidade de água disponível para o intempe-

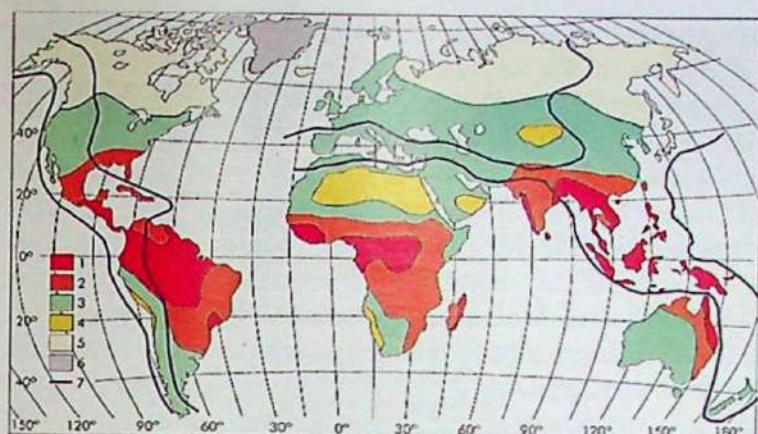


Figura 2. Distribuição dos principais processos de formação dos minerais secundários dos solos na superfície da Terra. 1 Zona de alitização, 2 Zona de monossialitização, 3 Zona de bisssialitização, 4 Zonas áridas sem alteração química, 5 Zona de acidólise total (hidrólise ácida), 6 Zona coberta por gelo, sem alteração química e 7 Áreas tectonicamente ativas, nas quais os tipos de alteração encontram-se modificados.

rismo das rochas e evolução do manto de alteração; por outro lado, fortes inclinações da vertente induzem movimentos importantes de materiais (movimentos de massa), que em situações extremas pode provocar o soterramento de materiais situados nas partes inferiores da vertente (coluvionamento).

A altitude, por meio da temperatura, influencia o fator biológico. Age sobre a seleção e adaptação da flora e da fauna, as quais têm papel importante na definição do tipo do material de alteração.

Organismos - desempenham um papel importante nos processos de intemperismo, pois podem influenciar a qualidade da água de alteração. A decomposição da matéria orgânica libera CO₂ e ácidos orgânicos, os quais dissolvidos nas águas de alteração reduzem seu pH. As raízes das plantas, da mesma forma podem reduzir em até duas unidades o pH no seu entorno, afetando substancialmente a especiação de certos elementos, como por exemplo, o alumínio e controlando seu comportamento. Ácidos orgânicos produzidos por microorganismos são excelentes extractores de ferro e alumínio das rochas. As superfícies de rochas colonizadas por liquens e algas são mais facilmente atacadas pelo intemperismo químico, pelo fato desses organismos secretarem substâncias ácidas ativas (ácidos oxálico, fenólico, etc.).

Tempo – fator preponderante, sobretudo para a evolução e desenvolvimento do manto de alteração. A influência do tempo é variada de acordo com o tipo de rocha e de clima ao qual esta se encontra submetida. Sob uma determinada condição climática, o mesmo intervalo de tempo pode promover a formação de uma cobertura de alteração bem desenvolvida sobre uma rocha sedimentar friável, e ser suficiente apenas para iniciar a alteração superficial de uma rocha compacta, dura, como, por exemplo, um granito.

Pedogênese Significando etimologicamente gênese do solo, é o processo, que atuando conjuntamente com o intemperismo, promove, na parte mais superficial do perfil

de alteração, a formação de um corpo organizado, que é o solo.

Na formação do solo é dada ênfase ao estudo dos fatores de formação do solo. Deve-se a Dokuchayev o conceito de solo como função de cinco fatores principais, clima, rocha matriz, organismos, relevo e altitude e tempo. Reconheceu também o papel preponderante do clima na sua formação. Jenny (1941) consagrou estes fatores na conhecida equação de Jenny, $S = f(m.o., c, r, o, t, \dots)$, onde **m.o.** é o material de origem, **c** o clima, **r** o relevo, **o** os organismos e **t** o tempo. Jenny salienta que são igualmente importantes como fatores de formação e de evolução do solo, o seu próprio clima (temperatura e drenagem existentes no interior do solo), os organismos que habitam seu interior e o relevo do solo, isto é o relevo de sua superfície (vertentes). Por outro lado, em apresentar sua equação aberta (...) ele deixa transparecer a possibilidade de outros fatores poderem ser considerados. Hoje, muitos pesquisadores admitem o homem, através de suas atividades construtivas e destrutivas um fator de grande importância (solos cultivados de longa data, solos desenvolvidos em sítios pré-históricos).

Os fatores de formação do solo são os mesmos que controlam o intemperismo e que levam à formação do saprolito. Um ponto importante a ser considerado é que a rocha, fator passivo no controle do intemperismo, constitui o material de origem do manto de alteração, mas não deve ser considerada da mesma forma na pedogênese. Na formação do solo, o saprolito é o seu material de origem. Se nas zonas temperadas o saprolito pode guardar forte relação com a rocha que lhe deu origem, seja do ponto de vista químico, seja mineralógico, o mesmo não ocorre nas zonas tropicais e equatoriais, onde a espessura do manto de alteração, bastante evoluído, apaga a influência da rocha na sua formação.

Formação dos solos A pedogênese se faz sentir na parte superior do saprolito, possibilitando a transformação de um material friável, móvel, anidro, mineral e abiótico em um corpo organizado, friável, poroso, hidratado, mineral e orgânico, capaz de assegurar a alimentação mineral dos organismos vivos autotróficos e, em particular, dos vegetais superiores.

Quatro componentes constituem os solos: substâncias minerais, matéria orgânica, água e ar. Estes componentes, em geral, apresentam-se intimamente associados, sendo por vezes difícil suas individualizações.

A fase sólida é majoritariamente mineral (45% em volume) e a matéria orgânica, apesar de sua importância para a organização e funcionamento do solo, aparece como um componente subsidiário (5% em volume). Os restantes 50% do solo formam o espaço poroso, contendo ar e água. Em condições normais de umidade para as plantas, o espaço poroso é preenchido aproximadamente por 25% de água e 25% de ar (figura 3).

Na fase sólida mineral é possível separar duas frações. Uma inativa, granulometricamente mais grossa, é formada, sobretudo por minerais resistentes ao intemperismo, herdados do material de origem, que se denomina *esqueleto do solo*. Outra, bastante ativa, concentrada na fração

argila do solo aparece intimamente associada à matéria orgânica do solo, para formar o complexo argilohumíco.

A vida necessita de água e de elementos minerais, que o solo fornece através do complexo argilohumíco. A fauna e a flora do solo têm um papel preponderante para a formação destas associações organo-minerais, além de participarem ativamente dos principais níveis de agregação dos solos (pedoplasmação) (figura 4).

Quatro mecanismos são fundamentais para reorganizar o saprolito e promover a formação do solo: *adição*, *subtração*, *transformação* e *translocação* (figura 5). (i) *adição de matéria*, proveniente de fontes externas, incluindo matéria orgânica de origem animal ou vegetal, poeiras minerais vindas da atmosfera, sais minerais trazidos por fluxo ascendente de soluções e resíduos de atividades humanas; (ii) *perdas de matéria* provocada pela lixiviação tanto física (matéria particulada), como química (em solução) e por ações antrópicas; (iii) *transformação de matéria*, em contato com os produtos da decomposição *post mortem* da matéria vegetal e animal e por intemperismo (iv) *transferência ou translocação de matéria* por fluxos de soluções no interior do material (movimentos laterais e verticais) ou, principalmente pela fauna (bioturbação), sendo as minhocas, seguidas pelas formigas os bioturbadores mais eficazes.

O Perfil de Solo A atuação desses quatro mecanismos no decorrer de um certo tempo vai promover o aparecimento de um material organizado em camadas, sensivelmente paralelas à superfície do terreno e que se diferenciam entre si por características físicas (cor, textura, estrutura, etc.) e químicas/mineralógicas (argilominerais, óxidos, hidróxidos, etc.). Estas camadas, denominadas horizontes, formam no seu conjunto uma seqüência vertical que caracterizam o perfil de solo (figura 6).

O perfil de solo comporta, portanto, uma série de horizontes, cujo número e propriedades variam em função do tipo de solo e de seu estágio de evolução. Cinco são os principais grupos de horizontes, denominados “horizontes chaves”, e representados pelos símbolos **O, A, E, B e C**.

Horizonte O – Camada orgânica, formada essencial-

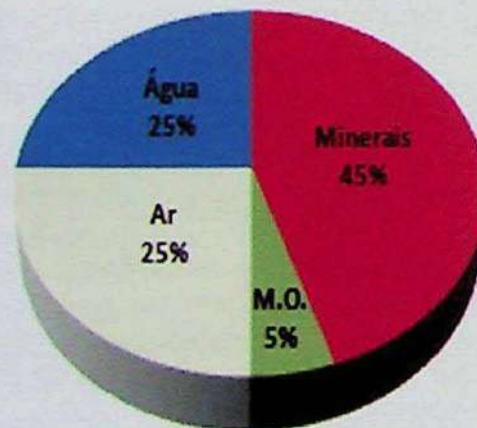


Figura 3. Distribuição percentual (em volume) dos componentes do solo. Os valores devem ser considerados para um solo representativo da média dos solos agriculturáveis. M.O. – matéria orgânica.



Figura 4. Principais etapas da formação do solo (adaptada de Robert, 1996)

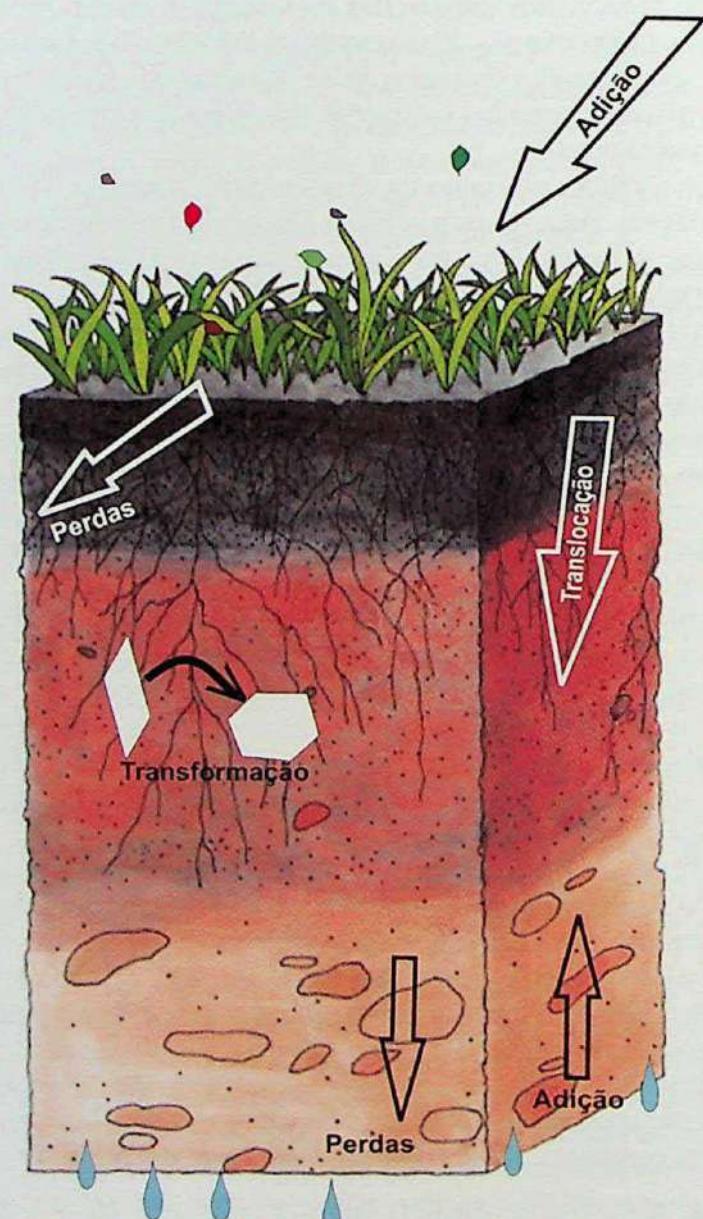


Figura 5. Mecanismos pedogenéticos.

mente por matéria vegetal morta, parcial ou totalmente decomposta.

Horizonte A – Nos solos desprovidos do horizonte O é a camada mais superficial do perfil, constituída essencialmente por matéria mineral (minerais residuais da rocha original e/ou minerais neoformados), a qual se encontra associada à matéria orgânica. A presença de matéria orgânica confere a esta camada uma coloração escura.

Horizonte E – Camada mineral, situada abaixo do horizonte A, mas nem sempre presente, representando a zona de máxima lixiviação ou eluviação dos constituintes do solo (húmus, argilominerais, elementos químicos, tais como Fe, Al e outros). A saída de matéria orgânica e de ferro confere a esta camada uma coloração bastante clara.

Horizonte B – Camada mineral de máxima iluviação, isto é, representa o horizonte de acumulação dos materiais do solo provenientes dos horizontes superiores, como por exemplo, os argilominerais.

Horizonte C - Considerado o material de origem do solo (saprolito), trata-se de um horizonte, quase que unicamente mineral formado por uma mistura de fragmentos de rocha alterada e minerais, sendo pouco ou não afetado pelos processos pedogenéticos.

DISTRIBUIÇÃO GLOBAL DOS SOLOS: OS SOLOS NÃO SÃO TODOS IGUAIS

Os solos encontrados na superfície da Terra não são todos iguais, pois suas gêneses dependem das diferentes combinações dos

fatores e dos mecanismos que controlam o intemperismo e a pedogênese, os quais são condicionados pelo clima. A observação dos solos, qualquer que seja a escala (local, regional ou global), mostra uma grande diversidade de tipos, cujas transições não se fazem de forma abrupta, mas sim gradativas. Esta diversidade se exprime em termos de sistemas pedológicos, que representam volumes de solos no interior dos quais os horizontes se organizam entre si, vertical e lateralmente, na escala da unidade de relevo (figura 7, Ruellan, 1993).

O conhecimento adquirido da repartição dos solos é, em geral, sintetizado sob a forma de mapas pedológicos, cuja realização é efetuada com base na classificação dos solos, que por sua vez considera suas diferentes propriedades e atributos.

Existem inúmeras classificações de solos elaboradas tanto em nível internacional (Soil World Reference Base –WRB -FAO/UNESCO, 1998) ou nacionais, como, por exemplo, a classificação americana (Soil Taxonomy System – Soil Survey Staff, 1990) e a brasileira (Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – SiBCS - Embrapa, 1999). Estas classificações, fundamentais para a confecção dos mapas de solos, apresentam dificuldades de utilização, pois são construídas com base na análise do perfil vertical, onde a superposição vertical dos horizontes é analisada, sem referência à dimensão lateral, não levando, portanto, em consideração a organização do solo na paisagem, tornando imprecisos os limites entre as unidades de solos que constituem a cobertura pedológica.

Entretanto, as classificações são importantes, sobretudo quando se analisa os solos na escala do globo. Como já enfatizado, os diferentes tipos de solos são decorrentes, sobretudo, do clima. Desta forma, é correto pensar que os solos não são todos iguais e, assim como a vegetação, sua distribuição obedece as zonas climáticas da Terra. São os denominados solos zonais. Entretanto, nem todos os solos são zonais, pois em uma mesma zona climática tipos diferentes de solos podem ocorrer em função da posição que ocupam no relevo (solos azonais) ou podem variar ainda em função do tipo do material de origem (solos intrazonais).

Na escala do planeta, o inventário dos solos, iniciado em princípios do século passado, desenvolveu-se rapidamente nos últimos 60 anos, sendo reunidos em várias versões do mapa de solo do mundo, cuja ultima edição é apresentada pela FAO (1998). A observação deste mapa (figura 8) permite conhecer com certo grau de detalhe a natureza dos principais solos que constituem a cobertura pedológica, assim como precisar sua repartição global. A partir de sua análise uma série de considerações pode ser feita: Desconsiderando as áreas desérticas frias ou quentes e as áreas montanhosas, com vertentes íngremes, onde a cobertura de solo, comumente descontínua, é pouco desenvolvida ou inexiste e que não foram representadas no mapa de solos do mundo por razão de escala, nas demais regiões, as coberturas pedológicas são contínuas, apresentando solos mais ou menos desenvolvidos. Os solos são de variados tipos e sua repartição na superfície do globo depende principalmente da latitude, o que significa dizer que o fator essencial de evolução é, predominantemente, do tipo bioclimático (solos zonais). Assim, vê-se que: (i)

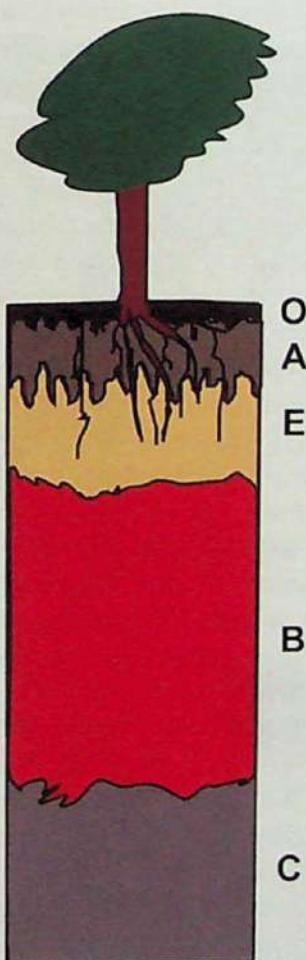


Figura 6. Perfil de solo, estando representados os horizontes chaves (diagnósticos).

nas regiões de altas latitudes, caracterizada por climas frios e pela existência de florestas resinosas, do tipo Taiga, dominam os Podzóis (Espodossolos - classificação brasileira); (ii) nas latitudes médias, correspondendo a uma zona delimitada, aproximadamente, por isotermas anuais de 5 a 15°C, ocorrem predominantemente, os solos das zonas temperadas, como por exemplo, Acrissolos (Argissolos - classificação brasileira); (iii) na zona intertropical, de clima quente e úmido dominam os Ferralsolos e Nitis-

solos (Latossolos e Nitossolos - classificação brasileira), os solos lixiviados tropicais e subtropicais, além de solos com menor representatividade como por exemplo, Vertissolos e Planossolos; (iv) finalmente, de um lado e de outro dos desertos tropicais, desenvolvem-se os solos salinos, Solonetz e Solonchaks (Planossolos Nátricos e Gleissolos Sálicos – classificação brasileira), com pequena expressão geográfica.

Se bem que os fatores bioclimáticos são preponderantes na escala de diferenciação dos solos do planeta, a repartição das coberturas pedológicas não chega a ser estritamente zonal e nem tampouco simétrica em relação ao Equador. A distribuição zonal dos solos não é respeitada na escala da paisagem, em regiões onde, por exemplo, a drenagem interna dos perfis (fluxo das soluções) torna-se o fator principal de sua evolução. Por outro lado, a distribuição assimétrica dos continentes em relação ao Equador faz com que os Podzóis, os solos Podzólicos boreais e os solos lixiviados de médias latitudes, largamente representados no Hemisfério Norte, não apareçam no Hemisfério Sul, com exceção do sul do Chile e da Nova Zelândia.

Deve ser ainda salientado, nesta distribuição, a importância da repartição de zonas montanhosas, que são bem representadas na Ásia, mas inexistem na África e na Austrália.

Por outro lado, não se pode deixar de considerar que ao

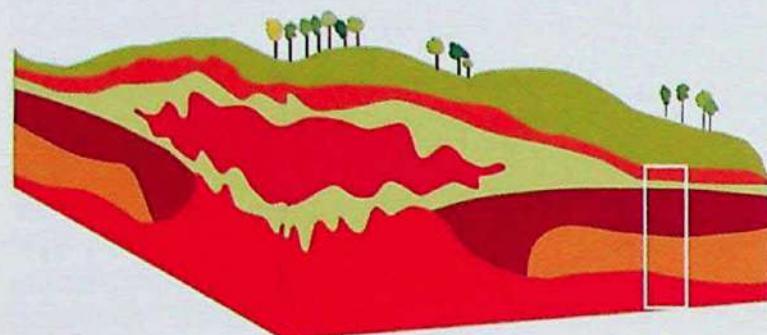


Figura 7. Bloco diagrama esquemático representando uma paisagem e uma cobertura de solos constituída de horizontes que se sobreponem verticalmente e se sucedem lateralmente (adaptada de Ruellan, 1993).

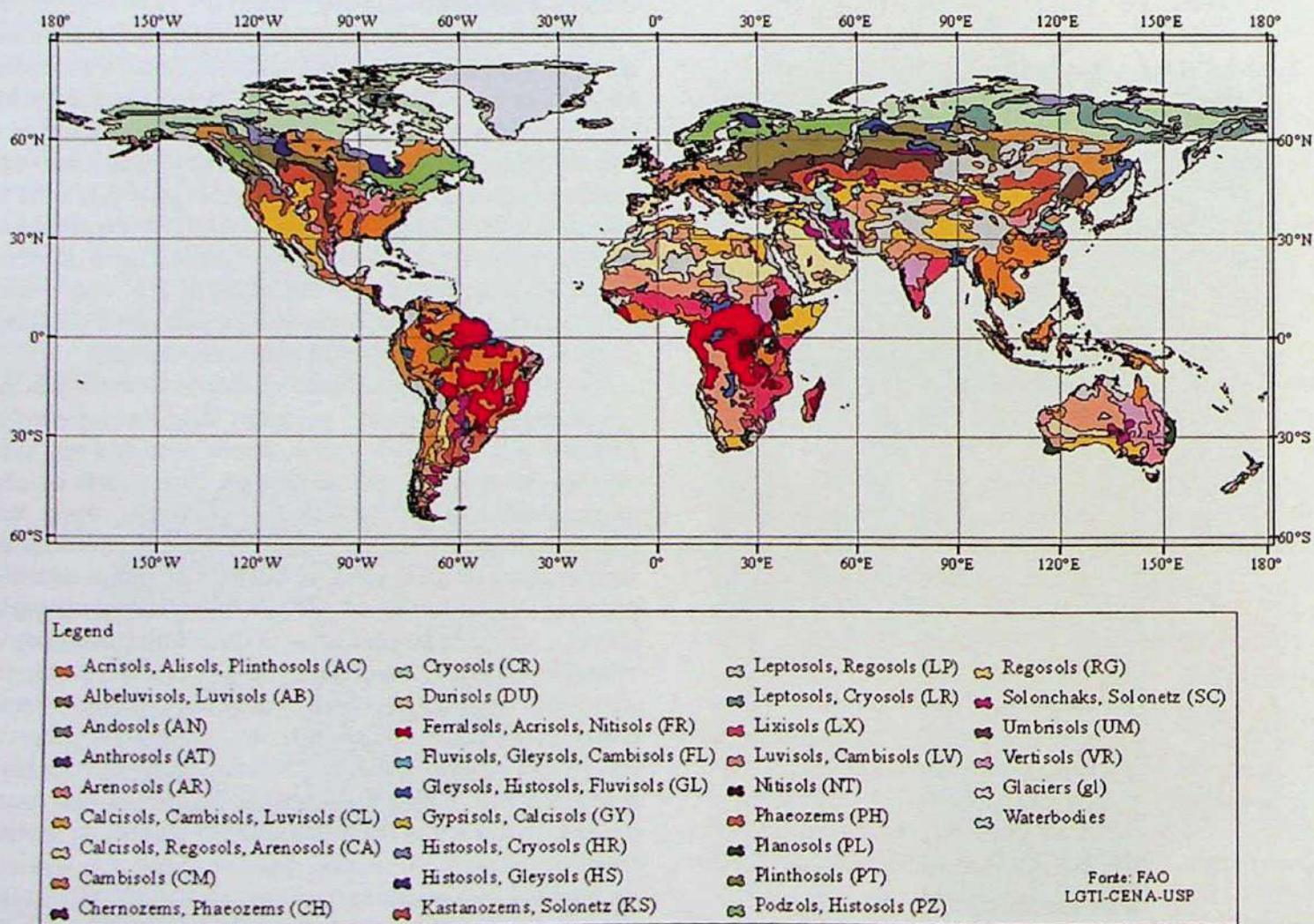


Figura 8. Mapa de solos do mundo (FAO/UNESCO, 1998).

lado dos fatores bioclimáticos, existe o fator tempo, pois a idade das coberturas pedológicas não é a mesma em todas as regiões em razão da ocorrência de diversos eventos que marcaram a história do planeta. Nas zonas peripolares e de médias latitudes, por exemplo, os solos são relativamente jovens, devido à ação de glaciações quaternárias, que eliminaram solos pré-existentes ou que depositaram formações sedimentares, tipo loess, sobre as quais solos jovens se desenvolveram. Nas zonas intertropicais, ao contrário, os fatores pedogenéticos atuaram por um tempo muito maior, pelo menos centenas de milhares de anos, o que permitiu o desenvolvimento de solos espessos, evoluídos e muito empobrecidos quimicamente.

Os solos brasileiros A estabilidade geotectônica do Brasil, que desde o Cretáceo não sofre perturbações estruturais de grande porte, aliado ao fato de seu território estar situado quase que inteiramente no domínio tropical úmido permitiu o desenvolvimento de uma cobertura de solos que reflete o fator climático como preponderante.

Os solos brasileiros se encontram bem estudados, graças aos trabalhos desenvolvidos pela EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária), que desde a década de 60 vem desenvolvendo levantamentos cartográficos sistemáticos, em todo o território brasileiro.

Algumas características são comuns a todos os solos de regiões tropicais, como, por exemplo, composição mineralógica simples (quartzo, caolinita, oxi-hidróxidos de ferro e de alumínio), grande espessura e horizontes com cores dominantemente amarelas e vermelhas. Em geral trata-se de solos empobrecidos quimicamente, reflexo de uma composição dominada por minerais desprovidos de elementos solúveis. São solos de baixa fertilidade, quando comparados com solos de clima temperado, ricos em argilominerais 2:1 capazes de reter os elementos químicos necessários ao metabolismo vegetal.

Os solos brasileiros são, em geral, bem desenvolvidos, quimicamente empobrecidos e profundos, sendo constituídos, predominantemente, por caolinita (argilomineral 1:1) associadas a óxidos e oxi-hidróxidos de ferro (hematita e goethita) e hidróxidos de alumínio (gibbsita). Cerca de 75% dos solos que cobrem o território brasileiro apresentam tais características sendo os principais representantes os Latossolos, Argissolos e Neossolos (figura 9; tabela 4). Apesar dos Latossolos, dominantes no Brasil, apresentarem baixa fertilidade, devido à intensa lixiviação de seus constituintes nutrientes, são solos bem adaptados à agricultura, devido seus excelentes atributos físicos que permitem boas respostas aos manejos agrícolas.

As características apresentadas pela maior parte dos solos do país são função dos processos genéticos e do longo tempo envolvido na sua formação. São solos velhos, frágeis e que se encontram em contínua evolução. Por representarem ecossistemas frágeis, os solos tropicais e, portanto, os solos brasileiros, são extremamente vulneráveis às ações antrópicas. O equilíbrio destes solos com o meio é delicado e os impactos provocados por causas naturais ou por atividades antrópicas pode desestabilizar o sistema.

SOLO, UMA INTERFACE NO MEIO AMBIENTE

Sendo um corpo vivo, ativo e em constante evolução e tendo como formação a interação entre as esferas que ocorrem na superfície do planeta – geosfera (litosfera), hidrosfera, atmosfera e biosfera, o solo não somente responde às condições ambientais, como também pode exercer uma marcada influência sobre estas esferas, sendo responsável direto ou indireto por muitas de suas características e propriedades.

Litosfera Em sua parte superficial, a litosfera é formada, sobretudo, por rochas silicatadas que estão sujeitas à ação do intemperismo. A influência da rocha, por meio de sua composição mineralógica, estrutura e textura, na formação do manto de alteração, sobre o qual os processos pedogenéticos vão atuar para a formação do solo, já foi ressaltada. O solo por sua vez, pode agir diretamente sobre as rochas influenciando o desenvolvimento do intemperismo, por meio do suprimento de água para o processo. Além disso, o solo interfere na formação do relevo, existindo uma estreita correlação entre os processos de pedogênese e de geomorfogênese. Finalmente o solo pode ser um agente importante na formação de rochas e jazidas minerais.

Para o intemperismo das rochas, a importância do solo reside no fato dele poder interferir tanto na quantidade, como na qualidade da água (solução) disponível para sua alteração.

O fluxo das soluções no interior do solo é função de sua estrutura e textura e da inclinação do terreno. Estes parâmetros definem as condições de drenagem interna do solo, importante para determinar o tipo de intemperismo a que a rocha será submetida. Condições de livre drenagem (ortomorfia) permitirão uma maior lixiviação dos elementos liberados na alteração dos minerais formadores das rochas e, consequentemente existência de soluções de alteração mais diluídas e, portanto mais ativa na dissolução dos minerais. Ao contrário, condições de drenagem impedida (hidromorfia) retardarão o intemperismo da rocha, pois a existência de soluções mais concentradas diminuirá a velocidade de dissolução dos minerais. Essas condições determinam, igualmente, as características de oxi-redução do meio, cujos valores podem afetar de forma diferenciada o comportamento de minerais que possuem em sua constituição elementos com mais de um estado de valência.

A qualidade das soluções que percolam o solo, definida pela sua composição química e propriedades físico-químicas, influencia de forma efetiva o intemperismo das rochas. De particular interesse é o pH das soluções do solo, cujos valores podem alterar o comportamento dinâmico dos elementos, interferindo na velocidade de solubilização dos minerais e na sua especiação no interior das soluções.

As propriedades mecânicas e hídricas dos solos têm influência nos movimentos de massa e nos processos de erosão, fenômenos de grande importância, em especial, nas regiões tropicais, como mecanismos da geomorfogênese (formação do relevo). Nestas regiões, solos espessos, associados a relevos íngremes e altos índices de precipitação, podem provocar deslizamentos de terra e danos ambientais de grande monta.

A influência dos solos na geosfera pode ser verificada na formação de sedimentos, rochas sedimentares e jazidas minerais. Nas ciências da Terra é comum considerar o solo

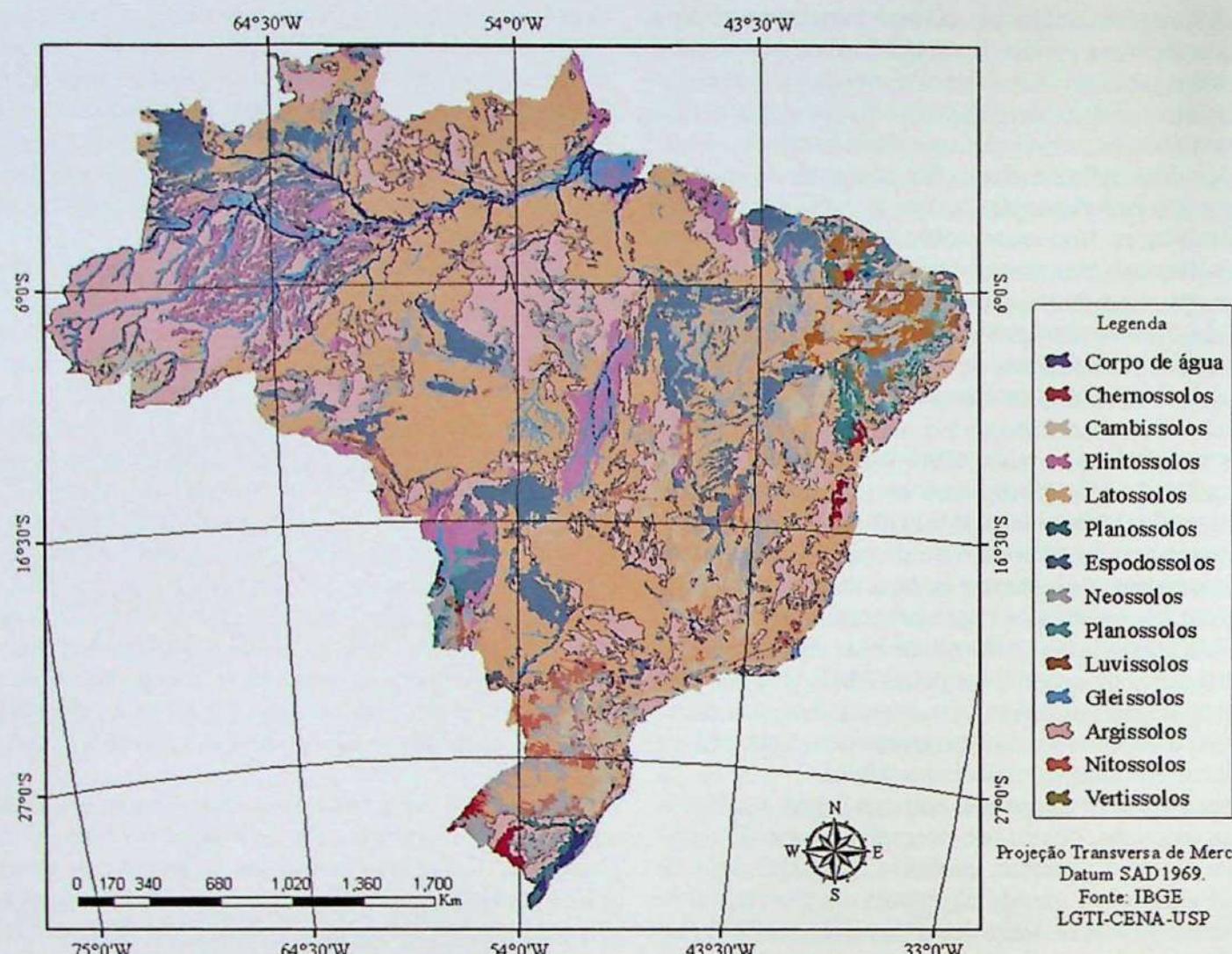


Figura 9. Mapa de distribuição dos solos brasileiros (IBGE, 2001).

Tabela 4. Classificação dos solos brasileiros e sua distribuição quantitativa aproximada (%).

SOLO	% da área total	Características
Latossolos	39	Solo altamente evoluído, laterizado, rico em argilominerais 1:1 e oxi-hidróxidos de ferro e alumínio.
Argissolos	20	Solo bem evoluído, argiloso, apresentando mobilização de argila da parte mais superficial
Neossolos	14	Solo pouco evoluído, com ausência de horizonte B. Predominam as características herdadas do material original.
Plintossolos	6	Solo com expressiva plintitização (segregação e concentração localizada de ferro)
Luvissolos	3	Solo com horizonte B de acumulação (B textural), formado por argila de atividade alta (bissialitização); horizonte superior lixiviado.
Cambissolos	3	Solo pouco desenvolvido, com horizonte B incipiente
Gleissolos	3	Solo hidromórfico (saturado em água), rico em matéria orgânica, apresentando intensa redução dos compostos de ferro.
Planossolos	3	Solo com forte perda de argila na parte superficial e concentração intensa de argila no horizonte subsuperficial.
Nitossolos	2	Solo bem evoluído (argila caulinitica – oxi-hidróxidos), fortemente estruturado (estrutura em blocos), apresentando superfícies brilhantes (cerosidade).
Espodossolos	2	Solo evidenciando a atuação do processo de podzolização; forte eluição de compostos aluminosos, com ou sem ferro; presença de humus ácido.
Vertissolos	2	Solo com desenvolvimento restrito; apresenta expansão e contração pela presença de argilas 2:1 expansivas
Chernossolos	<1	Solo com desenvolvimento médio; atuação de processos de bissialitização, podendo ou não apresentar acumulação de carbonato de cálcio.
Organossolos	<1	Solo essencialmente orgânico; material original constitui o próprio solo.
Corpos de água	2	
TOTAL	100	

como produto final da alteração da rocha. Este conceito é derivado do fato que a alteração superficial da rocha é sempre analisada como sendo uma evolução vertical. Isto não é exatamente correto, pois no interior dos horizontes podem existir também migrações laterais dos elementos disponibilizados pela alteração, que ocorrem na escala da paisagem. Podem, portanto, ocorrer fortes interações entre montante e jusante da paisagem. A geoquímica da superfície fornece os elementos necessários para a compreensão das intensas diferenciações geoquímicas que são suscetíveis de serem encontradas nestes materiais, diferenciações estas que podem conduzir a verdadeiras jazidas minerais. As jazidas supérgenas de alumínio (bauxita), manganês, ferro (couraças ferruginosas) são, em geral, de origem pedogenéticas. Da mesma forma, materiais originados do solo e transportados em solução (erosão química) ou na forma particulada (erosão física) pelos agentes da denudação podem formar sedimentos e serem a matéria prima de rochas sedimentares.

Hidrosfera É bem conhecida a interação entre solo e água, pois esta se constitui no principal agente do intemperismo e da pedogênese. A água desempenha um importante papel na gênese e evolução do solo, mas por outro lado, recebe do solo uma influência não desprezível que se reflete em sua qualidade e em seu comportamento dentro do ciclo supérgeno.

A hidrosfera é constituída por um conjunto de compartimentos conectados entre si pelo ciclo da água ou ciclo hidrológico. A água que atinge a superfície do solo via precipitação atmosférica, pode seguir diferentes caminhos: evaporar, escoar (run off) e infiltrar. A água de escoamento, que corre pela superfície do solo e alimenta os corpos d'água de superfície (rios, lagos, etc.) é a chamada *água superficial*. A água que se infiltra e que abastece as zonas subsaturadas e saturadas do solo é a chamada *água subsuperficial* e *água subterrânea*, respectivamente, as quais desempenham um importante papel ambiental, pois representam as águas disponibilizadas tanto para o crescimento das plantas, como para abastecer as reservas de água subterrânea.

Propriedades físicas do solo, como textura, estrutura e compactação podem controlar as relações quantitativas entre as águas de escoamento e as de infiltração, enquanto propriedades químicas e físico-químicas do solo podem influenciar sua qualidade.

Sendo maior a quantidade de água de escoamento, provocada pela existência de solos naturalmente impermeáveis ou compactados pelo intenso uso agrícola e em razão de manejos inadequados, o solo estará contribuindo para o incremento de processos erosivos, que além de facilitarem sua degradação, aumentam o transporte de material particulado que poderão provocar processos de assoreamento de rios, lagos e barragens.

A movimentação natural da água de infiltração, no interior do solo, em direção a zona saturada (lençol freático), é essencialmente comandada pela gravidade. Entretanto, determinadas propriedades físicas do solo, permitem que a água permaneça, total ou parcialmente, retida no interior do solo. Essa é a água que poderá ser disponibilizada para as plantas e que, em algumas situações irá alimentar os

corpos de água da zona subsaturada, formando os denominados lençóis suspensos.

A capacidade do solo em estocar água depende das propriedades da molécula de água, de sua interação com os sólidos orgânicos e inorgânicos constituintes do solo, da porosidade e permeabilidade do solo. Dependendo da sua dinâmica, a água do solo pode ser classificada em três categorias: (i) *água gravitacional* – aquela que circula livremente e que define a drenagem interna do solo. Para a agricultura, esta água é denominada de “*supérflua*”, pois não sendo utilizada pela planta, não oferece nenhum benefício para a vegetação. Entretanto, é extremamente importante para a alimentação dos corpos de água subterrânea; (ii) *água capilar* – aquela retida no solo pelas *forças de coesão*, isto é, forças geradas pela atração das moléculas de água entre si. Constitui a água disponível para os vegetais, cujas forças de retenção são mais fracas do que as de sucção dos vegetais; (iii) *água higroscópica* – aquela retida no solo pelas *forças de adesão*, isto é, forças originadas da atração das partículas do solo pelas moléculas de água. É a água indisponível para os vegetais, mas que pode ser utilizada pelos fungos e bactérias que se desenvolvem nos coloides orgânicos do solo. As forças de sucção exercida pelas plantas não são capazes de suplantar as forças de adesão (figura 10).

A influência do solo na hidrosfera também se faz sentir nas características químicas da água, tanto superficial, mas, sobretudo subterrânea. Ao se infiltrar no solo, a água percorrendo o caminho que vai desde a superfície até o lençol freático, incorpora gases e elementos provenientes das reações entre as soluções do solo e os compostos minerais ou orgânicos ali existentes. Neste caminho, a água, por meio de reações de dissolução ou de transformações de constituintes orgânicos ou minerais, incorpora compos-

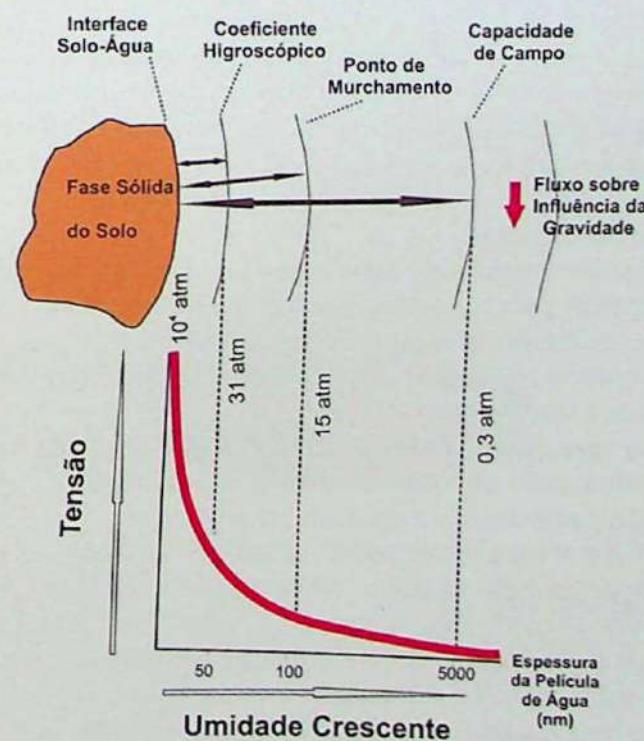


Figura 10. Classificação da água do solo de acordo com sua dinâmica (adaptada de Brady & Weil, 1996).

tos hidrossolúveis que passam a fazer parte de sua composição, modificando suas propriedades químicas e fisiocoquímicas, como por exemplo, pH, Eh, concentração em bicarbonato, Ca, Mg, Na, K, etc.

Atmosfera. O solo e a atmosfera possuem relações muito estreitas. O solo possui sua própria atmosfera, a qual se interrelaciona com a atmosfera da Terra por meio de constantes trocas de matéria (gases e vapor d'água) e de energia. Os efeitos dessa interação são sempre localizados, estando restritos ao espaço situado logo acima do solo. Seus efeitos são estudados pela microclimatologia. Porém, efeitos muitos mais abrangentes também podem ser verificados, como aqueles que provocam modificações na escala global (Ellis & Mellor, 1995).

O solo, que apresenta muitas de suas propriedades modificadas pela atmosfera, por exemplo, seu nível de acidez associado à precipitação de chuvas ácidas, pode interferir em algumas propriedades da atmosfera. Sua ação se faz sentir, sobretudo, na temperatura e umidade relativa do ar, nos movimentos de massas de ar e na modificação do comportamento do ciclo de certos elementos ambientais.

A cor do solo é um parâmetro importante no poder refletivo das radiações eletromagnéticas do sol que atingem o nosso planeta. O sol envia, para a superfície do solo, radiações eletromagnéticas de curto comprimento de onda (radiação na região do ultravioleta), que são, em parte, refletidas para a atmosfera, como radiações de longo comprimento (radiações na região do infravermelho), que produzem calor. Estas radiações são retidas na baixa atmosfera provocando seu aquecimento. A razão entre a radiação eletromagnética refletida pela superfície do solo e a incidente, denominada *albedo*, varia em função da cor do solo (Ellis & Mellor, 1995). Solos orgânicos, escuros podem apresentar albedos com valores baixos, da ordem de 5%, significando pequena refletância, enquanto que solos claros, pobres em matéria orgânica, com maior poder de refletância, podem apresentar albedos de até 60%. Desta forma, a cor do solo interfere na temperatura local da atmosfera. A cobertura vegetal influencia da mesma forma o albedo, interferindo na temperatura da atmosfera. Assim, zonas florestais apresentam baixos valores de albedo, enquanto zonas com pastagem ou de campo possuem valores mais elevados.

Os movimentos de massas de ar verificados na baixa atmosfera podem ser influenciados pelo solo. Solos com cores diferentes possuem temperaturas diferentes que podem promover circulações locais que interferem na velocidade e direção dos ventos.

A água líquida existente nos solos, em função da temperatura, pode passar para a atmosfera, na forma de vapor d'água, aumentando a umidade relativa do ar.

Uma interação importante entre solo e atmosfera diz respeito ao ciclo de certos elementos de importância ambiental. O efeito estufa, que ocorre naturalmente na Terra e que é o responsável pela existência de uma temperatura média de 15°C, é gerado pela existência de concentrações bem reduzidas, na atmosfera, de gases como o vapor d'água, o gás carbônico, o monóxido de carbono, o metano, os óxidos de nitrogênio, o ozônio e os clorofluorcarbonetos (CFC). O CO₂, por exemplo, gás mais importante

do efeito estufa, apresenta uma concentração na atmosfera que é regulada pelas trocas entre os diferentes reservatórios naturais (litosfera, oceanos, biosfera e atmosfera). A matéria orgânica dos solos e a vegetação desempenham um papel importante neste ciclo, tanto pelo estoque de carbono que eles representam, como pelo fluxo que eles induzem. Enquanto a atmosfera apresenta um estoque global de C de 730 pg (1 petagrama = 1 pg = 10¹⁸ toneladas) e a vegetação de aproximadamente 600 pg, os solos apresentam entre 1500-2000 pg (considerando um metro de espessura) e aproximadamente 800 pg quando são considerados apenas os primeiros 30 centímetros, região onde é maior a interação entre o solo e a atmosfera. Entretanto, estes estoques podem variar fortemente, num curto espaço de tempo, sob a influência antrópica ou climática. De acordo com o uso da terra, o solo pode ser um emissor de CO₂, com redução de seu estoque de carbono ou então um captador (seqüestrador) de CO₂, aumentando seu estoque.

A eliminação da floresta, por meio do corte da vegetação ou do fogo pode emitir uma grande quantidade de CO₂ para atmosfera (cerca de 100 a 200t de C/ha). Sua substituição por culturas agrícolas pode restituir parcialmente o estoque de C, caso a agricultura seja convencional ou praticamente a sua totalidade caso seja uma agricultura conservativa.

Biosfera Se por um lado o solo tem sua formação, em parte, controlada pela biosfera, esta sofre, por sua vez, igualmente a influência do solo. A principal influência exercida pelo solo sobre a biota diz respeito ao fornecimento para as plantas de nutrientes, tanto os macronutrientes (Ca, K, Mg, N, P e S), como os micro (Fe, Mn, Zn, Cl, B, Mo, Cu), os quais são essenciais para o crescimento vegetal.

O estoque desses elementos no solo é garantido, tanto pela ação do intemperismo e da pedogênese na alteração e transformação dos minerais existentes no solo, quanto pelas reações que ocorrem envolvendo a matéria orgânica do solo, a qual se constitui na principal fonte de alguns elementos essenciais ao crescimento das plantas, como por exemplo, o nitrogênio, o fósforo e o enxofre.

Existem solos que por natureza são ricos em elementos nutriente, são eles solos jovens, desenvolvidos em climas temperados frios e quentes sobre rochas ricas em bases (basaltos, anfibolitos, calcários, etc.). Enquanto outros, desenvolvidos em áreas tropicais úmidas e equatoriais e formados sobre rochas ácidas (granitos, quartzitos, etc.) são empobrecidos em macronutrientes, necessitando para um bom desempenho agrícola da adição de corretivos e fertilizantes. A falta ou carência de nutrientes, bem como a ausência de um balanceamento adequado à nutrição das plantas podem provocar problemas no seu desenvolvimento, perdas de biomassa vegetal e afetar a vida animal no solo. Pode também desenvolver patologias como a clorose (carência em ferro e outros elementos), necrose (deficiência em potássio e molibdênio), entre outras.

A mesofauna e os microorganismos também sofrem a influência do solo. Baixos níveis de matéria orgânica no solo, significando pouca disponibilidade de carbono e nitrogênio, podem reduzir e provocar adaptações de populações desses organismos.

A umidade do solo, definida pela drenagem, é um fator

importante para o crescimento das plantas. Solos úmidos, bem drenados e consequentemente bem arejados permitem um bom desenvolvimento das plantas, enquanto solos encharcados, mal drenados e mal arejados podem trazer sérios problemas para o desempenho dos vegetais. Condições anaeróbias afetam o metabolismo e o desenvolvimento de plantas não adaptadas a essas condições. Micro-organismos anaeróbios podem provocar a denitrificação, reduzindo nitratos a nitritos ou mesmo óxidos nitrosos e nitrogênio, empobrecendo o solo neste importante nutriente para a biota. Podem igualmente provocar problemas de toxicidade para as plantas.

A biota pode ainda ser influenciada pelo pH do solo, pois seus valores podem afetar a nutrição das plantas e a toxicidade do meio. Por exemplo, valores elevados de pH podem dificultar a disponibilidade de ferro, manganês e zinco, enquanto valores de pH baixos tornam cálcio e molibdênio mais facilmente disponíveis. Muitos outros nutrientes têm seus comportamentos modificados pelo pH.

A temperatura do solo pode influenciar a germinação de sementes e o crescimento das raízes.

SOLO: RECURSO A SER PRESERVADO A superfície continental total da Terra é de 13,5 bilhões de hectares, sendo que 11,5 bilhões são recobertos por solos (Nahon, 2008). Aparentemente, pela sua extensão na escala mundial, o solo parece ser um recurso natural inesgotável. Entretanto, aqueles que realmente apresentam propriedades e atributos apropriados para o uso agrícola representam apenas 22% da superfície total recoberta, ou seja, aproximadamente 2,6 bilhões de hectares (Pédro, 1984, Robert, 1996). Os restantes 78% são representados por solos que exibem problemas para a sua utilização agrícola, por ocorrerem em áreas com relevos montanhosos e vertentes íngremes (18%), em regiões de climas extremamente secos (17%), em zonas muito frias ou cobertas por gelo (25%), ou por serem solos muito úmidos (4%) ou extremamente pobres quimicamente (5%), ou ainda solos pedregosos e pouco espessos (9%) (figura 11).

Dos 22% dos solos agrícolas praticamente a metade encontra-se completamente utilizada, restando cerca de 1,3 bilhões de hectares como reserva disponível para o avanço das atividades agropecuárias.

A repartição desses solos agrícolas não é homogênea na superfície da Terra. Os países ricos da OCDE (Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico) possuem cerca de 800 milhões de hectares de terras cultiváveis de boa qualidade (solos com alta fertilidade), as quais são utilizadas intensivamente, produzindo excessões agrícolas. Por outro lado, os países das zonas tropicais, representando o mundo em desenvolvimento, e detendo cerca de 70% dos solos cultiváveis (cerca de 1,8 bilhões de hectares), possuem problemas na produção de alimentos. Dois fatores concorrem para esta situação: o primeiro, por ser esta a região com a maior concentração populacional do planeta, o que gera, consequentemente, uma maior demanda por alimentos e, o segundo pelo fato dos solos tropicais apresentarem sérias restrições para uma boa produção agrícola, pois, por razões climáticas e de evolução do relevo, são solos velhos, frágeis e empobrecidos qui-

mamente. Estes solos, para o desenvolvimento de uma agricultura intensiva necessitam práticas e manejos específicos, que requerem aplicações de corretivos, fertilizantes e herbicidas em quantidades razoáveis, práticas que podem acabar refletindo negativamente na qualidade dos solos e do meio ambiente.

Não somente a agricultura, mas qualquer atividade humana que envolve o uso do solo provoca distúrbios em sua organização e no seu funcionamento. Se as práticas adotadas em seu uso não forem bem conduzidas, esses distúrbios podem levar o solo à degradação e, em casos extremos à destruição.

A degradação do solo não é somente decorrente de sua utilização pelo homem, podendo se dar igualmente por causas naturais, sendo que os fatores envolvidos no intemperismo e pedogênese, atuando por períodos demasiadamente longos, provocam seu empobrecimento em elementos nutritivos para as plantas e na sua acidificação. Por isso os solos tropicais são frágeis e empobrecidos. A ação antrópica age no mesmo sentido, porém acelera em muito os processos de degradação. A degradação natural é um processo muito lento e quase imperceptível na escala da vida humana, enquanto a degradação antrópica é muito mais rápida e perceptível pelo homem.

O conceito de degradação do solo deve ser entendido como a deterioração de suas propriedades, ou em outras palavras a perda parcial ou total de uma ou mais de suas funções. As funções do solo podem ser agrupadas em funções ecológicas (produção de biomassa, fornecimento de nutrientes, água e ar, produção de alimentos e de energia renovável, filtro biológico, habitat biológico e reserva genética de flora e da fauna) e funções relacionadas às atividades humanas (obras civis de engenharia, depósitos de resíduos, fonte de matérias primas para a construção e indústria mineral, fonte de informações geológicas, arqueológicas e paleontológicas). Para Lal (1999), a degradação do solo condiciona duas ameaças principais para o planeta. A primeira diz respeito à redução da capacidade produtiva do solo, enquanto a segunda, mais ampla, pode afetar o clima global, através das alterações nos ciclos dos gases do efeito estufa e de outros elementos de importância ambiental.

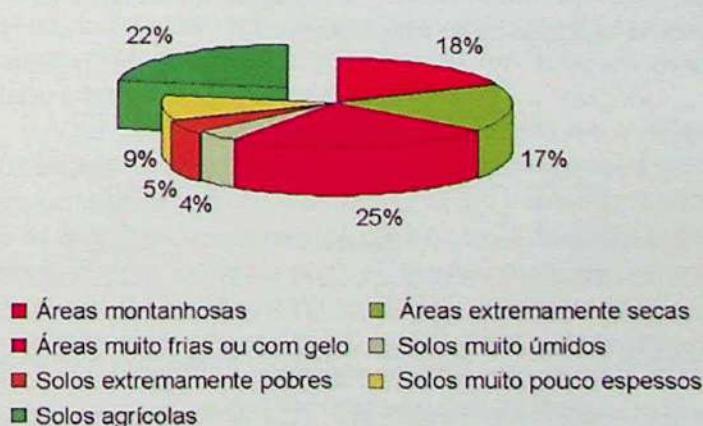


Figura 11 – Recursos mundiais em solos agrícolas e em solos que apresentam problemas para sua utilização na agricultura (adaptada de Pédro, 1984).

A degradação natural do solo, sobre a qual o homem tem poucos meios para alterá-la, e a antrópica, cuja ação do homem pode ser efetiva para a sua remediação, podem ser agrupadas em três tipos: degradações físicas, degradações químicas e degradações biológicas (figura 12).

A degradação física diz respeito à desorganização estrutural do solo e à deteriorização de seus atributos físicos. Como consequência pode produzir compactação de seus horizontes superiores, facilitar sua erosão e afetar a disponibilidade de água no solo.

A degradação química do solo é caracterizada pelo empobrecimento de sua reserva em nutrientes, devido à excessiva lixiviação de cátions (alcalinos e alcalino-terrosos) que provoca a acidificação do meio.

A degradação biológica conduz à redução do conteúdo de matéria orgânica no solo, diminuição da biodiversidade e decréscimo na atividade microbólica no solo.

Degradação física do solo

COMPACTAÇÃO A compactação pode ocorrer naturalmente, sobretudo em áreas tropicais, sendo porém um processo extremamente lento. Quando provocada por ações antrópicas, ligadas a práticas culturais (utilização de máquinas pesadas no preparo da terra, pisoteio do gado ou ainda desmatamento) o processo pode se verificar mais rapidamente e, por vezes, num espaço de tempo inferior a 10 anos pode-se formar horizontes compactados.

A compactação é um fenômeno físico que se produz devido à diminuição do espaço poroso existente entre as partículas do solo. Representa uma compressão de massa de solo em um volume menor (adensamento). A compactação altera a estrutura, a condutividade hidráulica e térmica do solo, comprometendo a penetração de raízes e reduzindo a produtividade agrícola.

A compactação interfere na relação entre a água de escoamento ("run off") e a infiltração. O aumento no fluxo da água de escoamento, devido à compactação, facilita a ação de processos erosivos, diminui a água de infiltração e aumenta a taxa de evaporação, diminuindo a disponibilidade da água necessária ao crescimento vegetal.

Trata-se de um fenômeno de grande amplitude que afeta solos de todas as regiões do mundo. Na Europa, Robert (1996) estima que cerca de 33 milhões de hectares de solos, que representam 4% dos solos agriculturáveis, encontram-se afetados pela compactação.

EROSÃO Trata-se de um processo geral de degradação do solo que pode ocorrer em qualquer região do globo, porém seus efeitos são mais marcados nas regiões tropicais úmidas, devido à ação erosiva da água (erosão hídrica ou pluvial) e nas regiões semi-áridas, pela ação dos ventos. Sua atuação provoca efeitos deletérios no solo, consequência da perda d'água e de nutrientes vegetais (inclusive matéria orgânica) em ritmos acelerados. Pode ainda provocar a perda total do solo, além de ocasionar danos ambientais nos cursos d'água, pela deposição das partículas de solo nos rios.

A erosão é um fenômeno natural que sempre existiu, sendo o processo responsável pelo transporte dos sedimentos que, após deposição e diagênese, darão origem as rochas sedimentares. A ação do homem, porém, pode ser atualmente considerada como uma das causas mais importante de erosão dos solos, sendo responsável pela erosão de 26 bilhões de toneladas de material por ano, ou seja, 2,6 vezes maior que as quantidades anuais devidas a erosão natural. Estima-se que 17% dos solos do mundo são degradados pela erosão e que 0,3% a 0,5% da cobertura de solo desaparecem a cada ano por ação da erosão (Nahon, 2008).

O uso da terra é sem dúvida o fator mais significativo para a erosão do solo, pois o simples desmatamento modifica a relação entre a água de infiltração e de escoamento. O escoamento superficial pode aumentar em até 20 vezes quando é cortada a floresta nativa (Nahon, 2008). Nenhum solo cultivado está livre dos efeitos da erosão. Estima-se que cerca de 80% dos solos cultivados do estado de São Paulo estejam sofrendo os efeitos da erosão, causando perdas de cerca 190 milhões de toneladas de terra por ano, sendo que quase 50 milhões atingem os cursos d'água, na forma de sedimentos transportados, causando assoreamento e poluição dos mesmos (Bellinazzi e Bertolli, 1981).

Portanto, além da perda de solos agriculturáveis, a erosão possui várias outras consequências, tais como: (i) perda de nutrientes naturais ou fornecidos pelos fertilizantes; (ii) perda da capacidade produtiva; (iii) aumenta a possibilidade de eutrofização das águas superficiais pelo aumento de nutrientes; (iv) aumento da carga sólida dos corpos d'água naturais ou artificiais (barragens) provocando, por exemplo, assoreamento, poluição e redução na produção de energia.

Desertificação O processo de desertificação pode ser entendido de várias maneiras. Ramade (1987) define como a expansão do deserto em detrimento de ecossistemas estépicos, representando uma deficiência hídrica devida a uma modificação bioclimática que se repercuta através do solo. Rodrigues (1986) define como o empobrecimento dos ecossistemas terrestre sujeito à ação antrópica. Na realidade, a desertificação deve ser entendida como sendo a degradação de solos nas regiões áridas, semi-áridas e subúmidas do planeta, resultante de vários fatores, incluindo variações climáticas e atividades humanas. Representa um conjunto de causas que provoca a perda parcial ou total do solo no ambiente físico, da biomassa no ambiente biológico e da qualidade de vida no ambiente humano. Apesar de ser um fenômeno típico das zonas áridas e semi-áridas, ele pode afetar solos de todas as regiões do planeta.



Figura 12 – Principais tipos de degradação dos solos (adaptada de Robert, 1996).

As regiões semi-áridas do mundo, apesar de possuírem peculiaridades que as diferenciam entre si, exibem determinadas características que são comuns a todas elas e, entre estas está a vocação natural para a desertificação. Em virtude da expressão geográfica e dos altos riscos de deteriorização a que estão sujeitas, ultimamente muitos países vêm dando atenção especial a estas áreas, visando deter ou mesmo impedir a desertificação.

Cerca da metade dos países do planeta possui parte ou mesmo a totalidade de seus territórios constituídos por zonas áridas ou semi-áridas. O risco de desertificação atinge cerca de 30% da superfície terrestre, envolvendo uma população de 2,6 bilhões de pessoas. Apesar desses números, a desertificação está avançando de maneira preocupante, estimando-se que hoje ela avança cerca de 6 milhões de hectares por ano. Sobretudo na África, o problema da desertificação é notável e tem como causa primeira as atividades desenvolvidas pelos homens que habitam as regiões semi-áridas. A vegetação arbustiva da savana é intensamente utilizada e destruída pelo fogo, pela coleta da lenha para aquecimento e para o cozimento de alimentos, para a fabricação de carvão, para alimentar os rebanhos (caprinos), ficando o terreno completamente desprotegido e sujeito a erosão e a desertificação.

No Brasil, o semi-árido nordestino, conhecido como “polígono das secas”, englobando além do nordeste o norte de Minas Gerais (cerca de 2 milhões de km²) representa a região com maior propensão à desertificação. Entretanto, regiões fora do semi-árido nordestino, mas onde se desenvolve uma intensa atividade agrícola, vêm sofrendo os impactos da desertificação, como é o caso dos estados do Rio Grande do Sul e São Paulo, onde solos arenosos apresentam fortes indícios de desertificação.

Cálculos efetuados pela FAO, no final do século passado, estimavam que aproximadamente 1/3 de suas terras cultivadas do mundo eram perdidas pelo avanço da desertificação e que a cada ano ela inutiliza completa ou quase completamente cerca de 21 milhões de hectares de terra.

Degradação química dos solos A degradação química do solo pode ser resultado de processos naturais, entretanto, atualmente o uso intensivo do solo para a produção de alimentos e para a deposição de resíduos, urbanos, industriais e agrícolas, contribui significativamente para sua deterioração.

EMPOBRECIMENTO EM ELEMENTOS NUTRIENTES E ACIDIFICAÇÃO - Estes dois fenômenos são associados, pois a maior parte dos elementos nutrientes são cátions básicos, que reduzem a acidez do solo. Desde que este se encontra empobrecido em cátions básicos, sua acidez aumenta. Solos ácidos e empobrecidos em elementos nutrientes podem ser formados por processos naturais que dependem do material de origem, do clima e do tempo de atuação dos fatores de formação do solo. Esses processos naturais que levam a acidificação dos solos são observados mais frequentemente e com maior intensidade nas zonas tropicais úmidas do globo, onde são comuns solos bem evoluídos, fortemente empobrecidos e ácidos, como é o caso dos Latossolos do Brasil e da África. (processo de lateritação).

Nas regiões frias do globo, solos ácidos são freqüentes, mas sua formação encontra-se associada à existência de baixas temperaturas, que permitem uma evolução incompleta da matéria orgânica, com a formação de compostos ácidos hidrossolúveis. Neste caso, uma rocha original, com teor elevado em silício (granitos, arenitos, quartzitos, etc.) também favorece a formação de solos ácidos.

A ação antrópica atua no mesmo sentido que os processos naturais, intensificando a ação e acelerando o processo. A utilização intensiva dos solos nas atividades agrícolas esgota o estoque de elementos nutrientes e a aplicação intensiva de fertilizantes nitrogenados pode levar a acidificação. Um dos grandes problemas ligados à acidificação dos solos reside na liberação do alumínio sob forma trocável, que resulta em certa toxicidade para as plantas. É conhecido o efeito do alumínio sobre o comprimento das raízes vegetais. Medidas feitas em raízes de soja mostraram que dobrando a atividade do alumínio o comprimento das raízes diminui de mais de 20% e, consequentemente há redução de produtividade (Nahon, 2008).

Finalmente, a acidez dos solos pode ser adquirida pela incorporação pelo solo da precipitação ácida (úmida ou seca) vindo da atmosfera. Chuvas ácidas (o pH pode atingir valores de até 1,5) incorporam ao solo uma certa quantidade de compostos de enxofre e nitrogênio. Existem solos que têm a capacidade de neutralizar (poder tampão) a ação desses compostos ácidos, enquanto outros são mais sensíveis aos seus efeitos. Nas regiões com altas emissões de compostos ácidos (Nordeste dos Estados Unidos e Norte da Europa) a existência de solos sensíveis à acidificação compromete seu uso agrícola. No Brasil, Melfi et al. (2004) realizaram um levantamento mostrando que cerca de 80 % dos solos brasileiros são altamente vulneráveis à ação das chuvas ácidas.

DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS – Desde os primórdios das civilizações o solo tem sido utilizado como solução final para a disposição de resíduos produzidos pelo homem. Muitos destes resíduos são altamente poluidores e tóxicos para o homem e para o meio ambiente.

A poluição provocada pelo uso agrícola do solo tem se intensificado pela utilização cada vez maior de fertilizantes inorgânicos, pesticidas e herbicidas. Estes produtos provocam problemas de acidez nos solos, como mencionado, e a persistência de resíduos tóxicos. Lixiviação de nitrato pode promover a eutrofização das águas de superfície e comprometer a saúde humana.

A poluição provocada por resíduos urbanos e industriais resulta de uma série de atividades humanas. Fontes específicas de poluição do solo incluem a construção civil e os entulhos de demolições, produção de resíduos metálicos, em particular de metais pesados, extração mineral, produção de energia, resíduos orgânicos, entre outras.

Em regiões altamente industrializadas a deposição de metais tóxicos e a acidez são as principais causas da degradação química do solo. Um clássico exemplo citado na literatura por Logan (1990) exibe os altos valores de acidez e os elevados níveis de Ni e Cu em solos nos arredores de uma siderúrgica localizada em Ontário, Canadá. O pH encontrado nas vizinhanças da siderúrgica era inferior a 3,

enquanto os teores de Ni e Cu eram respectivamente de 9000 e 7000 mg kg⁻¹. Nos solos regionais estes valores se situavam ao redor de 20 mg kg⁻¹. Estas condições propiciam níveis altamente fitotóxicos destes metais no solo.

Outra fonte de poluição que provoca a degradação química do solo é a sua contaminação progressiva por radionuclídeos. A disposição de resíduos radioativos teve início na década de 1950, por ocasião dos testes nucleares, e vem aumentando com a geração de energia nuclear. Os acidentes com usinas nucleares contribuem para a deposição de elementos radioativos (¹⁴C, ¹³⁷Cs, ¹³¹I, ⁹⁰Sr) no solo. A maior deposição de radionuclídeos ocorreu no acidente da usina de Chernobil, na República da Ucrânia. Acidentes localizados podem ocorrer com a manipulação de equipamentos ou resíduos radiativos. No Brasil, a mais grave contaminação do solo com radionuclídeos ocorreu em Goiana em 1987, pela disposição no solo de uma cápsula de ¹³⁷Cs. Este acidente obrigou a remoção de várias toneladas de solo contaminado e seu acondicionamento em recipientes especiais.

SALINIZAÇÃO E SODIFICAÇÃO – A salinização é o processo que permite a acumulação de sais no solo, enquanto a sodificação refere-se ao predomínio de Na⁺ no complexo de troca do solo. São processos típicos de regiões áridas e semi-áridas, onde as taxas de evaporação excedem as de precipitação. Podem, igualmente, ser resultado da existência de uma rocha original rica em sódio ou de águas de subsuperfície ricas em sais de sódio.

A salinização pode ser classificada como primária ou secundária. A salinização primária é aquela ligada a uma causa natural, devido à concentração anormal de sais nos solos, podendo ocorrer em diferentes latitudes e altitudes, mas especialmente nas zonas quentes e áridas. A salinização dita secundária, ao contrário é ligada à ação antrópica, provocada principalmente pela irrigação, sobretudo em zonas com baixa pluviosidade, onde a água utilizada pode apresentar teores mais elevados em sais. Outras atividades antrópicas podem, igualmente, provocar a salinização dos solos, como por exemplo, superexploração de água subterrânea em zonas costeira, permitindo a intrusão de água do mar e utilização de sais para degelar as estradas durante o inverno.

A salinização é uma das causas de baixa produtividade agrícola dos solos nas regiões áridas e semi-áridas do mundo. Para eliminar este problema e, portanto, aumentar a produtividade, numerosos projetos de irrigação foram implantados em várias partes do globo. Entretanto, a prática da irrigação nestas áreas onde o lençol freático está próximo da superfície pode, como salientado, intensificar e aumentar o perigo da salinização. Isto porque, a água de irrigação nas regiões áridas e semi-áridas contém sais em sua constituição e libera também outros sais imobilizados no solo por meio da dissolução de minerais. A intensa evaporação nestas áreas promove a concentração de sais dissolvidos na solução do solo. Fertilizantes e produtos da decomposição da matéria orgânica também atuam como fontes adicionais de sais.

Degradação biológica dos solos A degradação biológica

do solo está relacionada ao dano ou a eliminação completa de uma ou mais populações significativas de micro-organismos do solo, freqüentemente com mudanças nos processos biogeoquímicos dos ecossistemas associados.

Qualquer tipo de degradação, física ou química, pode afetar a população de microorganismos do solo, porém sua quantificação é difícil de ser realizada, pois até o presente momento somente 10% desta população foi recenseada, sendo desta forma quase impossível apreciar uma diminuição na diversidade microbiológica. Medidas indiretas, como a determinação da variação de certas funções exercidas pelos microorganismos (degradação e mineralização da matéria orgânica, nitrificação, respiração, etc.) podem fornecer certas indicações.

Os efeitos provocados pela degradação do solo na fauna e na flora são mais facilmente identificados. A agricultura intensiva pode provocar importante redução dos organismos presentes no solo. Isto se torna bem evidente pela redução da quantidade de minhocas. Degradações que provocam a desertificação do solo se traduzem pela quase ou total extinção da vegetação de superfície. O mesmo efeito é encontrado na salinização, cujo efeito reduz abruptamente as espécies vegetais, permitindo o aparecimento de espécies adaptadas aos sais (halófitas).

As degradações físicas (por exemplo, compactação, reserva de água, variações de porosidade) modificam o funcionamento biológico dos solos. A nitrificação cede lugar a denitrificação, aparecem fenômenos de redução do ferro, do manganês e o gás carbônico passa a metano. A erosão do solo reduz seu teor em matéria orgânica e consequentemente elimina os microorganismos que se encontram associados.

Considerando a importância do solo e o fato deste ser um recurso finito na escala da vida humana, ações preventivas e conservacionistas devem ser empregadas para sua preservação e recuperação.

DO SOLO À ROCHA O solo como um corpo vivo e ativo encontra-se em constante evolução, a qual se processa sob a ação dos agentes, mecanismos e fatores que controlam o intemperismo e a pedogênese. Sua evolução depende, essencialmente, das condições bioclimáticas, que permitem a geração de diferentes tipos de solos, que se distribuem pelas diferentes regiões do globo. Entretanto, como qualquer corpo vivo, o solo sofre a influência do fator tempo, cuja atuação pode provocar sua degradação ou mesmo destruição.

O solo nasce, passa por uma fase jovem, evolui, atinge a fase adulta (matura) e com o passar do tempo pode atingir a senilidade. Nesta seqüência evolutiva o tempo age inicialmente sobre o plano geoquímico, promovendo seu empobrecimento em elementos solúveis e, portanto móveis e concentrando os elementos menos solúveis. Em uma segunda etapa, quando a lixiviação atinge um determinado patamar, o tempo passa a agir sobre o complexo argilohumíco, provocando sua desestruturação. Esta evolução, esquematizada por Pedro (1985), pode ser resumida da seguinte forma.

Na fase jovem, o solo caracteriza-se por apresentar uma componente mineral dominante, possuindo uma alta reser-

va em nutrientes (cátions básicos alcalinos e alcalino terrosos), associada à presença de minerais primários alteráveis, que formam o esqueleto do solo, e um complexo argilohúmico pouco desenvolvido. Do ponto de vista da fertilidade, o solo é pobre, resumindo-se praticamente a um material inerte, com características muito próximas a de um saprolito. Nesta fase o desenvolvimento da biosfera é incipiente.

Com o tempo o solo evolui para a formação de um meio equilibrado, onde a reserva de nutrientes é ainda importante e a fertilidade é alta, consequência da existência de um complexo argilohúmico bem desenvolvido. A biosfera atinge sua plenitude.

Em uma etapa mais avançada, este equilíbrio pode ser rompido, pois a lixiviação contínua esgota a reserva em nutrientes e o complexo argilohúmico começa a se desestruturar. A desestruturação se dá pela quebra das ligações complexo-esqueleto do solo, havendo liberação de argila, sob a forma dispersa, a qual pode ser transportada mecanicamente pelas águas de infiltração (verticalmente) ou superficial/subsuperficial (lateralmente). O que resta, "in situ" é um resíduo do esqueleto e que de acordo com o material de origem pode ser arenoso ou siltoso. Neste resíduo encontram-se minerais primários altamente resistentes à alteração, como por exemplo, o quartzo e a muscovita, ao lado de minerais secundários, como calcita, gibbsita, óxidos de ferro e sais, dependendo das condições bioclimáticas existentes. Neste estágio o meio torna-se inerte, esgotado e impróprio para o desenvolvimento da biosfera (figura 13).

Nos solos de zonas de clima menos agressivo (temperadas) o meio equilibrado pode manter-se por um espaço de tempo muito longo, enquanto nas zonas tropicais úmidas e equatoriais a fase madura é rapidamente ultrapassada.

Desta forma, dependendo das regiões bioclimáticas do globo os solos podem, com o tempo, evoluir para materiais anidros, incoerentes ou coerentes com características muito próximas a de um sedimento ou de uma rocha.

Nas zonas frias, ou mesmo equatoriais úmidas, como por exemplo, na região amazônica, Espodossolos podem evoluir para sedimentos arenosos (areias brancas). Nas

regiões semi-áridas, solos alcalinos, Gleissolos Sálicos e Planossolos Nátricos podem formar crostas calcárias e nas zonas tropicais úmidas, Latossolos podem com o tempo evoluir para a formação de rochas compactas, duras do tipo bauxita ou "laterita" (couraça ferruginosa).

Um dos exemplos mais marcantes da passagem solo-sedimento, em função do tempo de atuação excessivamente longo dos processos de transformação durante sua evolução é encontrado na região Amazônica. Nesta região, Latossolos que servem de suporte para a floresta tropical densa se transformam, naturalmente, em sedimentos arenosos, constituídos essencialmente por quartzo, sendo, portanto formações estéries e abióticas. Este exemplo foi esquematizado por Pêdro (1985) e teve sua evolução estudada no campo por Lucas et al. (1995).

Nas vertentes dos platôs da média bacia Amazônica, esculpidos sobre rochas sedimentares da Formação Alter do Chão, de idade cretácea, os solos tornam-se progressivamente mais arenosos em direção às partes mais baixas. A jusante das vertentes mais longas o solo desaparece, dando lugar a grandes corpos de areia quartzosa residual, as quais podem atingir espessuras por vezes superiores a 10 metros (figura 14).

Por meio de processos ligados à hidromorfia e evolução durante um longo espaço de tempo, os Latossolos, já empobrecidos geoquimicamente perdem progressivamente seu complexo argilohúmico. Eles se acidificam e se empobrecem de tal maneira que a formação florestal existente começa a se degradar, dando lugar a outro tipo de vegetação, a campinarana. A mineralização da camada vegetal superficial (serrapilheira) se faz de forma cada vez mais incompleta (estágio Latossolo de transição, figura 14). Neste estágio se individualiza um tipo de humus (Mor) em superfície, que se decompõe lentamente liberando ácidos orgânicos para o meio. A podzolização se instala nesta fase, com o embranquecimento de horizontes superiores do solo e individualização de um horizonte B húmico (horizonte com acumulação de matéria orgânica, Bh). A vegetação se degrada ainda mais intensamente passando a uma vegetação tipo campina. Em seguida, o empobrecimento torna-se tal que toda a vegetação tem tendência a desaparecer, restando somente algas e liquens, assim como a serrapilheira, com sua produção de ácidos orgânicos, precursores do humus. A podzolização se interrompe, mas a lixiviação pelas águas da chuva continua (da ordem de 20 milhões de litros por hectare por ano), o que leva a degradação dos horizontes B húmicos que se tornam instáveis, levando à formação de horizontes de areia branca.

Desta forma, vê-se que um solo bem desenvolvido, como o Latossolo, constituído por argilominerais, óxidos e hidróxidos de ferro e de alumínio associados a quartzo e alguns minerais pesados, pode com o decorrer do tempo apresentar uma série de transformações que levam à formação de um sedimento arenoso. Estas transformações que podem levar a passagem do solo à rocha ocorrem naturalmente, sem intervenção do homem, porém num espaço de tempo grande, da ordem de milhões de anos. A ação antrópica pode provocar o mesmo fenômeno, porém num intervalo de tempo bem menor, dentro da escala da vida humana.

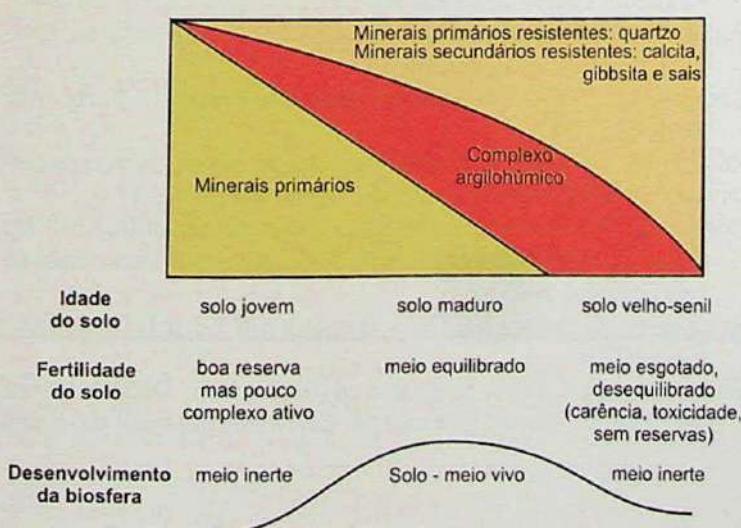


Figura 13. Variação da fertilidade de um solo em função do tempo de evolução (adaptada de Pêdro, 1985).

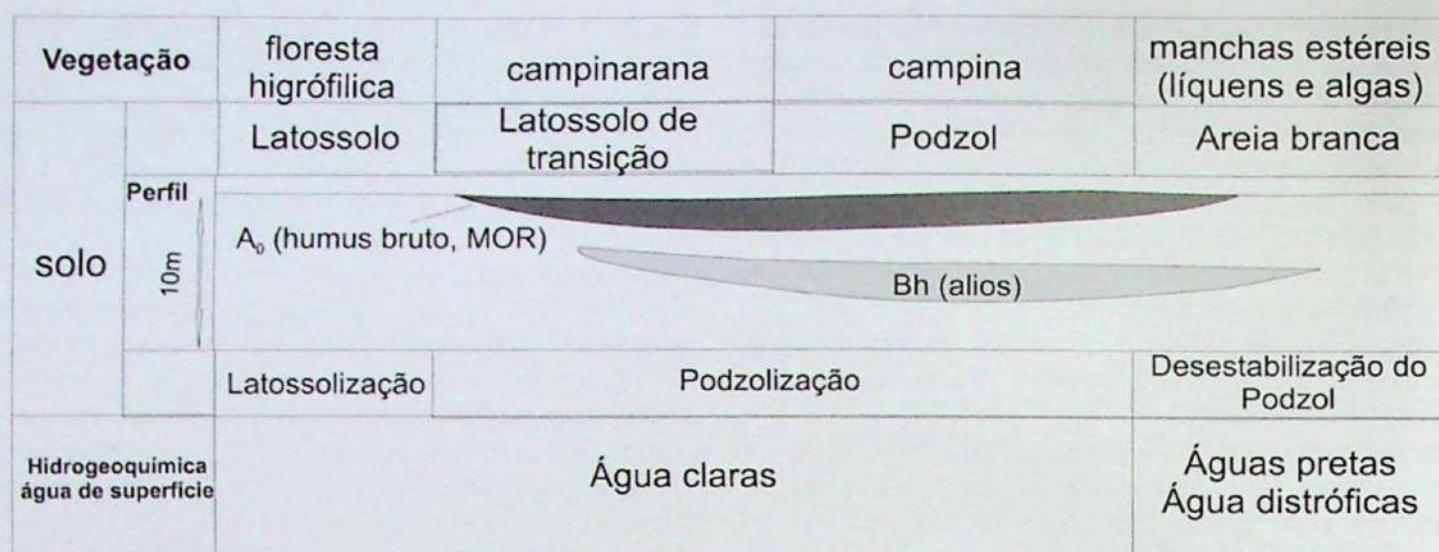


Figura 14. Etapas da transformação de solos da região Amazônica (Latossolos) em areia branca (adaptada de Pédro, 1985).

CONCLUSÕES Neste capítulo foram analisados os processos envolvidos na gênese e evolução dos solos, desde a sua formação, a partir de um material inorgânico e abiótico (saprolito), originado pelo intemperismo das rochas da Litosfera até a sua degradação (natural ou antrópica) e volta para um material inorgânico e abiótico (areia quartzosa, couraça ferruginosa, bauxita). Neste caminho percorrido pelo solo foi mostrado como o meio

ambiente interage e influencia as propriedades do solo, mas ao mesmo tempo como ele interfere em muitas propriedades apresentadas pelos diferentes compartimentos do meio ambiente (Litosfera, Atmosfera, Hidrosfera e Biosfera). Desta forma, fica clara a relação existente entre o solo e o meio ambiente e a importância de seu estudo na compreensão das mudanças globais relacionadas ao uso da Terra, na sua concepção mais ampla.

Referências

- Bellinazzi Jr., R. & Bertolini, D. 1981. Ocorrência da erosão rural no Estado de São Paulo. In: Simpósio sobre o Controle da Erosão, IBGE, 1: 117-137
- Brady, N.C. & Weil, R.R. 1996. The nature and properties of soils 11^a ed., New Jersey, Prentice Hall.
- Ellis, S & Mellor, A. 1995. Soils and Environnement. London, Routledge, 364 p.
- EMBRAPA (1999) – Sistema de classificação de solos, EMBRAPA Solos, Rio de Janeiro
- FAO/UNESCO. 1998. Soil map of the world, 1:5.000.000, Paris, FAO/UNESCO.
- IBGE, Diretoria de Geociências. 2001. Mapa de Solos do Brasil, Escala 1:5.000.000, Rio de Janeiro, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.
- Jenny, H. 1941. Factors of soil formation. New York, Mc Graw-Hill.
- Lal, R. and Stewart, B.A. 1990. Soil degradation: A Global Threat. In: Advances in Soil Science. New York, Springer-Verlag., 1, p. 1-11
- Lal, R. 1999. Soil erosion and land degradation: the global risks. In: Advances in Soil Science, 11: 129-172
- Logan, T.J. 1990. Chemical degradation of soils. In: Advances in Soil Science, 11, p. 187-221
- Lucas, Y., Nahon, D., Cornu, S., Eyrolle, F. 1995. Genèse et fonctionnement des sols en milieu équatorial. C. R. Acad. Sci. Paris, 322, série IIa: 1-16
- Melfi, A.J., Montes, C.R., Carvalho, A., Forti, M.C. 2004. Use of pedological maps in the identification of sensitive soils to acid deposition: application to brazilian soils. Anais da Academia Brasileira de Ciências, 76 (1):139-145.
- Nahon, D. 2008. L'Épuisement de La Terre . Paris, Odili Jacob, 235 p..
- Pédro, G. 1985. Le sol, composante majeure de la biosphère. Revue du Palais de La Découverte, Paris, 13(126): 20-50
- Pédro, G. 1984. Les grandes tendances des sols mondiaux. Cultivar "Sols et sous-sols, 68-81.
- Ramade, F. 1987. Les catastrophes écologiques, Paris, Mc Graw-Hill. 318 p.
- Robert, M. 1996. Le sol: interface dans l'environnement, ressource pour le développement. Paris, Masson, 244 p..
- Rodrigues, V. 1986. Aspectos conceituais da desertificação. In: Seminário sobre desertificação no Nordeste. Documento final, Brasília, 26-27.
- Ruellan, A. & Dosso, M. 1993. Regards sur Le sol. Paris, Foucher, 192 p.
- Soil Survey Staff. 1990. Keys to Soils Taxonomy. Department of Agriculture. Natural Resources Conservation Service. 8 Ed.

Terra e vida

Kenitiro Suguio^{1,2}, William Sallun Filho³ & Alethaea Ernandes Martins Sallun³

***1 - Departamento de Geologia Sedimentar e Ambiental, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo,
Rua do Lago, 562 - 05508-080, São Paulo, SP, kenitirosuguio@hotmail.com***

***2 - Centro de Pós-Graduação, Pesquisa e Extensão (CEPPE), Universidade Guarulhos (UnG), Rua Dr. Nilo
Peçanha, 81 (Prédio U – 6º andar) - 07023-070, Guarulhos, SP***

***3 - Instituto Geológico, Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo, Avenida Miguel Stéfano, 3900 -
04301-903, São Paulo, SP, wsallun@igeologico.sp.gov.br, alethea@igeologico.sp.gov.br***

Terra e Vida

Kenitiro Suguio, William Sallun Filho & Aletháea Ernandes Martins Sallun

Resumo Presume-se pelos dados disponíveis, que o universo tenha se originado há aproximadamente 13 bilhões de anos e a Terra teria se formado no Sistema Solar há cerca de 4,6 bilhões de anos. Durante o Eon Criptozóico (vida oculta), que abrange cerca de 90% do tempo total de sua existência, o seu meio-ambiente era tão inhospitável que era habitado por seres muito primitivos, constituídos comumente de microrganismos. A partir disso, tanto a Terra quanto as suas condições ambientais passaram por longa história evolutiva, durante o Eon Fanerozóico (vida aparente), interrompida por diversas e drásticas crises, que quase dizimaram grande parte dos seres então viventes. Pelos últimos dados conhecidos, o surgimento dos primeiros hominídeos ocorreu somente há 7 milhões de anos e o *Homo sapiens*, que originou o homem contemporâneo teria surgido somente há 100 mil anos. Em tempo tão curto, a civilização humana atingiu grande capacidade construtiva, mas também destrutiva, que está colocando em perigo a sua própria existência, embora a continuidade de existência da Terra esteja, em princípio, assegurada por tempo igual ao decorrido de sua existência.

Palavras-chave: Terra, vida, geologia, evolução, extinção.

Abstract *EARTH AND LIFE* According to the available data, it is presumed that the universe has been originated at approximately 13 billion years ago, and that the Earth was formed within the Solar System at about 4.6 billion years ago. During the Cryptozoic Eon (hidden life time interval), which embraces about 90% of its existence, its environment was so inhospitable that was inhabited by very primitive beings, commonly represented by micro-organisms. Departing from this point, the Earth as much its environmental conditions were submitted to a long evolutionary history, during the Phanerozoic Eon (apparent life time interval), interrupted by several hard crisis, which almost exterminated great part of the living beings of that time. Based on the first hominids occurred only about 7 million years ago, and the *Homo sapiens*, that originated the contemporaneous man, could have appeared only about 100 thousand years ago. In so short time interval, the human civilization attained such constructional capacity, but also destructive capacity, that is placing in a big risk his own existence, nevertheless the continuity of the Earth's existence is, in principle, assured at least for a time interval equal to its past existence.

Keywords: Earth, life, geology, evolution, extinction.

ORIGEM DO PLANETA TERRA As tentativas para desvendar o passado da Terra conduzem, quase inevitavelmente, à origem do próprio Universo que, de acordo com a moderna física, teria tido início a partir de um “ponto” que, ao se tornar infinitamente quente e sólido, teria propiciado a “Grande Explosão” (em inglês: Big Bang). A depender da velocidade inicial de expansão até a massa atual do universo, relacionada aos parâmetros observáveis, ela pode ou não atingir o estado de máxima expansão e novamente sofrerá colapso e retornará ao “ponto” de partida.

O universo teria se formado há aproximadamente 13 bilhões de anos e continua em expansão até os dias atuais. A Terra teria sido originada juntamente com o Sistema Solar há cerca de 4,6 bilhões de anos, em volta do Sol situado no seu centro. A Lua que gira em volta da Terra, teria sido originada através de choques de pequenos planetas do tamanho de Marte, há aproximadamente 4,5 bilhões de anos.

Ao girar em torno da Terra, por efeito da sua gravidade, a Lua produz o fenômeno das marés oceânicas no nosso planeta. As marés enchéntes e vazantes imprimem nos organismos o ritmo de vida e também interferem nas camadas superficiais da Terra. Finalmente, é possível que a Lua até desempenhe o papel de escudo na proteção da Terra contra o impacto de muitos meteoritos.

Além disso, se o corpo celeste que originou a Lua fosse

um pouco maior, é provável que a Terra tivesse desaparecido pois acredita-se que, durante as suas formações, os planetas colidiam mutuamente com freqüência 100 milhões de vezes superior à atual. Essas numerosas colisões interplanetárias poderiam ter comprometido a sua própria existência. Nessa incrível e dura batalha, por um feliz acaso, a Terra restou como um “sobrevivente”!

Cada vez que o nosso planeta incorporava pequenos planetas e meteoritos, a energia de colisão era convertida em calor com várias centenas de graus centígrados e a sua superfície era transformada num “mar de magma”. Este estágio de “verdadeira bola de fogo” corresponde à imagem da Terra em seus primórdios.

Entretanto, há cerca de 4,3 bilhões de anos teria ocorrido o resfriamento, com a consequente transformação do vapor d’água em água líquida, que teria originado o oceano primitivo. A seguir, o nosso planeta teria sido envolvido por uma capa relativamente “delgada” de água, cuja espessura média atingia 4 km, quando ainda os continentes estavam ausentes.

O resfriamento do magma poderia ter originado o basalto que, a grandes profundidades de algumas dezenas de quilômetros, poderia ter sofrido nova fusão com incorporação de água do mar e teria gerado o granito cuja existência, até o momento, só foi confirmada no nosso planeta. Para explicar

o possível mecanismo que conduz o basalto e a água do mar até grandes profundidades subterrâneas foi idealizada a “teoria de tectônica de placas”. Parece admissível supor hoje em dia, que este mecanismo geológico já estava ativo há pelo menos 4 bilhões de anos. O granito formado desta maneira exibe densidade menor que a do basalto e, portanto, teria emergido até a superfície para originar os continentes, que se acham circundados pelos oceanos.

Admite-se a hipótese de que em Marte, o planeta mais próximo do nosso, também tenha existido um oceano primitivo. Este oceano poderia ter sido extinto pela ausência de campo gravitacional suficientemente forte para o seu “aprisionamento”. Por outro lado, em Vênus, que se situa também próximo ao Sol, as altas temperaturas reinantes podem ter evaporado toda a água do oceano primitivo. A existência deste oceano primitivo, que foi preservado até os dias atuais, representou uma diferença decisiva para a Terra em relação aos outros planetas mais próximos. Posteriormente este fato ensejou o surgimento da atmosfera primitiva há 4 bilhões de anos, seguido do aparecimento da vida há 3,8 bilhões de anos (Figura 1).

ORIGEM DA ATMOSFERA

A atmosfera primitiva da Terra, conforme estudos de gases vulcânicos, deveria

ser bem diferente da atual. Pensa-se que o vapor d’água (H_2O), o dióxido de carbono (CO_2), o monóxido de carbono (CO) e o hidrogênio (H_2) tenham sido os componentes principais (Tabela 1).

A Tabela 1 apresenta semelhança com as composições químicas atuais das atmosferas de Marte e Vênus, que são os dois planetas mais próximos da Terra no Sistema Solar. São caracterizadas pela grande abundância de dióxido de carbono que, neste particular, diferencia-se muito da composição química atual da atmosfera terrestre (Tabela 2).

A composição química da atmosfera primitiva da Terra sofreu modificações lentas até chegar à situação atual. As mudanças ocorridas estão intimamente relacionadas à evolução do planeta e do oceano, além dos animais e vegetais ali viventes (Figura 2).

Entre os gases redutores componentes da atmosfera, que se supõe terem sido emanados em épocas primitivas de formação da Terra, ocorreu expulsão de grande parte do hidrogênio, quando a atmosfera adquiriu características mais oxidantes.

Embora os seres vivos mais antigos da Terra tenham surgido nos fundos oceânicos há 3,8 bilhões de anos, eram representados por microrganismos primitivos e pratica-

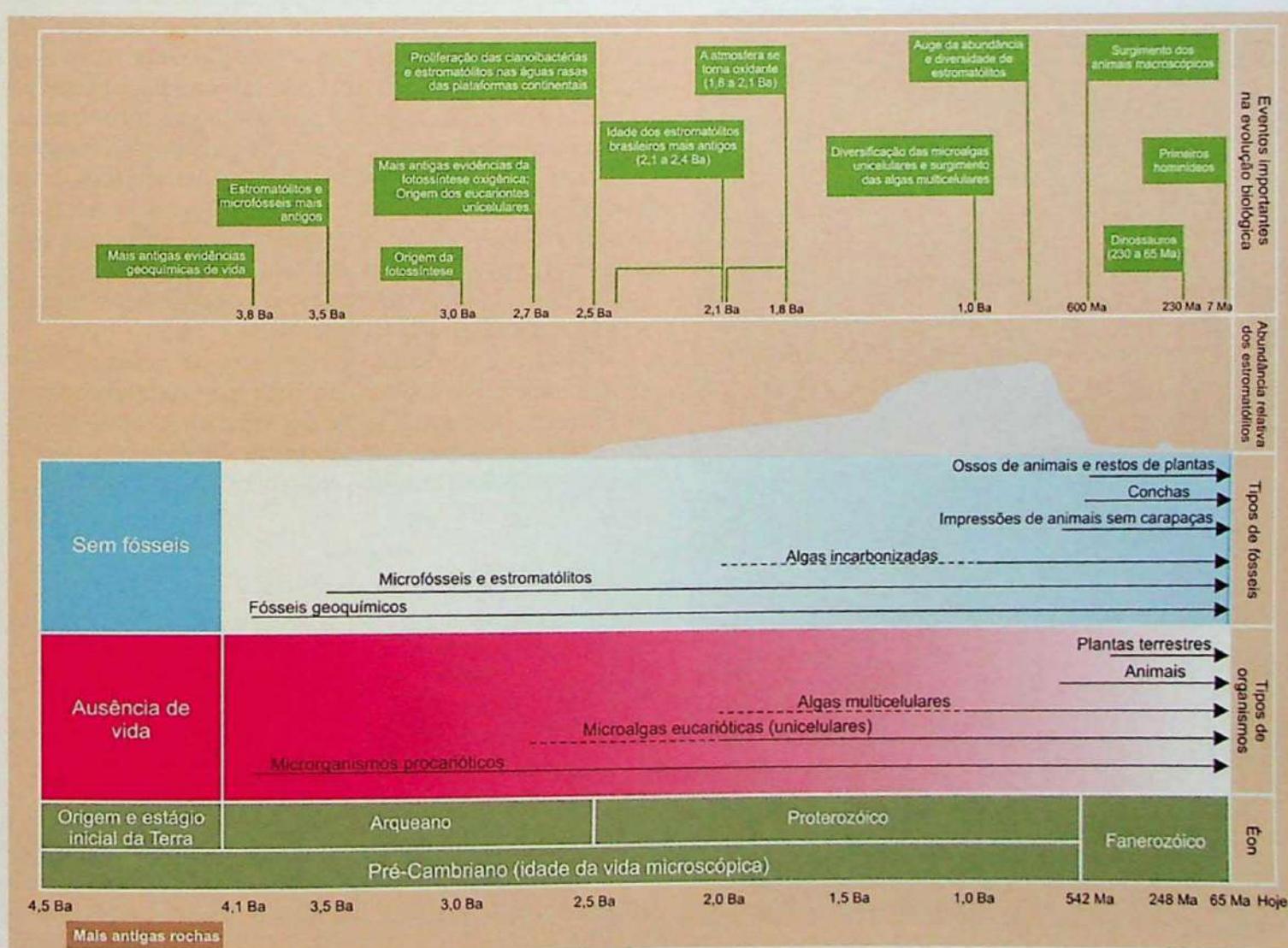


Figura 1: As escalas de tempo geológica e biológica, definidas a partir de estudos de rochas e fósseis, permitem situar o surgimento da vida e os principais eventos evolutivos da Terra (modificado de Sallum Filho & Fairchild 2005).

mente sem fósseis preservados. Esta realidade testemunha a extrema agressividade dos ambientes naturais da Terra em épocas primitivas.

A atmosfera atual da Terra corresponde a uma camada gasosa de cerca de 1.000 km de espessura. A partir da superfície da Terra, de 0 a 10 km tem-se a troposfera, de 10 a 80 km a estratosfera e acima disso tem-se a ionosfera. Entre 500 a 800 km a velocidade de movimentação das moléculas aproxima-se da velocidade de escape do campo gravitacional. A troposfera e a porção inferior da estratosfera são compostas de ar atmosférico, mas a parte superior da estratosfera e a ionosfera exibem composição distinta do ar atmosférico. Pela decomposição devida aos raios ultravioletas, pela influência de raios cósmicos ou por ação dos ventos solares, devem existir átomos de hidrogênio e hélio ou oxigênio, nitrogênio e sódio ionizados.

O fitoplâncton marinho ($C_{org}:P \sim 106:1$) fornece C orgânico e P para os sedimentos marinhos ricos em matéria orgânica. Estudos de sedimentos com a razão do conteúdo de carbono orgânico e fósforo ($C_{org}:P$) indicam uma considerável variação em folhelhos durante o Fanerozóico (<10:1 no Permiano; >1000:1 no Devoniano), refletindo a influência de condições redutoras nas condições diagenéticas de remobilização de C e P. As razões de $C_{org}:P$ nos sedimentos indicam a influência de condições de pressão de oxigênio (pO_2) da atmosfera em escala global. Durante a maior parte do Devoniano, os níveis atmosféricos de O_2 se mantiveram suficientemente baixos, o que proporcionou uma anomalia no registro fóssil de carvão neste período. As condições de redução nos oceanos resultam em mecanismos positivos e negativos que tendem a estabilizar as concentrações de oxigênio atmosférico durante o

tempo geológico (Figura 3).

ORIGEM DA VIDA Os primeiros seres vivos possuíam uma estrutura primitiva, desprovida de núcleo celular. Imagina-se que as bactérias (microrganismos primitivos), que viviam na presença de sulfeto de hidrogênio (H_2S) dissolvido nas águas oceânicas, teriam surgido há 3,8 bilhões de anos (Figura 1).

Pensa-se também, que a Lua tenha desempenhado um papel importante na origem da vida, pois ela se encontrava muito mais próxima da Terra que hoje em dia. Portanto, as marés possuíam amplitudes bem maiores e, com isto, a força gravitacional desenvolvida teria atuado com maior eficiência na aglutinação das matérias orgânicas componentes dos seres vivos, que antes estavam completamente dispersas. A origem da vida teria sido parcialmente favorecida pelos movimentos ritmicos ditados pelas marés lunares.

Os organismos capazes de realizar a fotossíntese, com utilização de gás carbônico (CO_2) como matéria-prima, tiveram condições para surgimento há 3 bilhões de anos. Na mesma época, em função da dinâmica do planeta, foram desenvolvidas ativas correntes de convecção no interior da Terra, que teriam levado à aglutinação de diversos continentes para originar um único supercontinente há 1,9 bilhão de anos.

O intervalo de tempo geológico de formação do oceano e da atmosfera primitivas, que propiciou o surgimento dos primeiros seres vivos, compreendido entre cerca de 4 e 2,5 bilhões de anos, é comumente denominado de Arqueano ou Arqueozóico. O tempo geológico subsequente, quando o oxigênio tornou-se mais abundante na atmosfera e ocorreu o advento dos seres vivos multicelulares, entre aproximadamente 2,5 bilhões e 600 milhões de anos, é designado de Proterozóico (Figura 1). Neste período os mares rasos favoreceram a expansão de esteiras microbianas que formaram estromatólitos, que dominaram o mundo até 600 milhões de anos (Figura 4).

A "Fauna de Ediacara", composta de animais marinhos do fim do Pré-Cambriano, foi encontrada nas colinas de Ediacara (450 km a oeste de Adelaide, Austrália) em 1947. É representada por *Sprigia* e *Dickinsonia* (semelhantes à medusa), etc., que estão bem preservadas apesar

Tabela 1 – Composição química da atmosfera primitiva da Terra.

Composição química	Teores (%)
CO_2 (dióxido de carbono)	mais de 90
N_2 (nitrogênio)	7
H_2S (gás sulfidrico)	3
O_2 (oxigênio)	elemento-traço

Tabela 2 – Comparação entre os parâmetros característicos, inclusive de composições químicas das atmosferas, de Vênus, Terra e Marte. O peso do Sol é de $1,99 \times 10^{33}$ gramas (Kitano 1995).

Parâmetros	Vênus	Terra	Marte
1. Distância do Sol ($\times 10^6$ km)	107	148,8	277
2. Peso (g)	$4,87 \times 10^{27}$	$5,98 \times 10^{27}$	$6,4 \times 10^{27}$
3. Razão de peso (Terra=1)	0,815	1,000	0,107
4. Peso específico	5,21	5,52	3,94
5. Pressão atmosférica	90	1	1/132
6. Temp. média superficial ($^{\circ}C$)	500	15	-60
7. Compostos químicos atm. (%)	CO_2 (dióxido de carbono)	96,5	0,034
	N_2 (nitrogênio)	3,5	78,1
	O_2 (oxigênio)	2×10^{-3}	20,9
	Ar (argônio)	7×10^{-3}	0,93
	H_2O (água)	2×10^{-3}	(0 a 40)

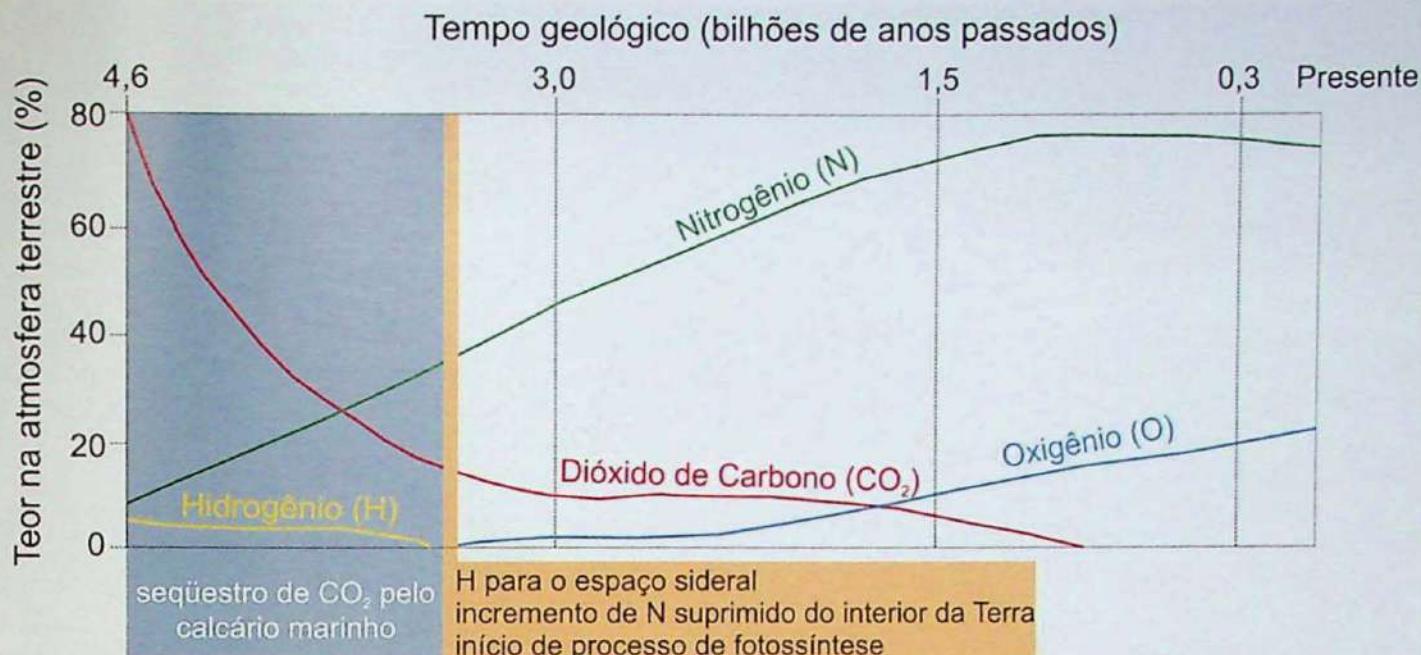


Figura 2: Alterações na composição química da atmosfera ao longo do tempo. No início (4,6 bilhões de anos) a atmosfera terrestre era muito rica em dióxido de carbono, com baixos teores de nitrogênio e hidrogênio e apenas traços de oxigênio. Atualmente, a atmosfera terrestre é composta por mais de 70% de nitrogênio e cerca de 20% de oxigênio, além de teores menores de outros gases (Cattermole 1995).

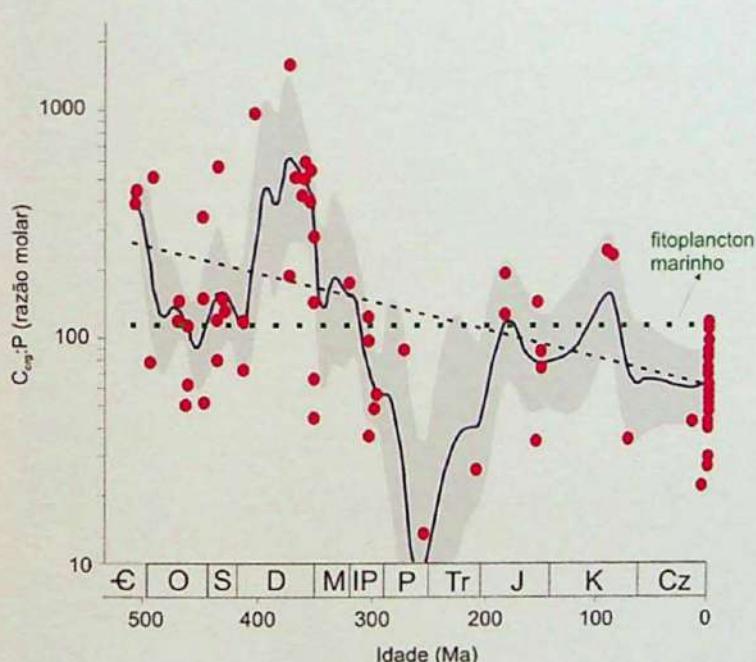


Figura 3: Medianas das razões entre carbono orgânico e fósforo ($C_{org}:P$) obtidas em diversas unidades geológicas fanerozóicas (Algeo & Ingall 2007). Os valores de $C_{org}:P$ decresceram desde o Cambriano (~260:1) até o Recente (~65:1), com valores muito menores no Permiano-Triássico, demonstrando a existência de uma variação secular ao longo do tempo geológico.

da idade antiga e do corpo desprovido de qualquer forma de esqueleto. Fósseis semelhantes aos de Ediacara também ocorrem na África do Sul e na Inglaterra, além do Brasil (Figura 5).

Durante a Era Paleozóica, que representa o tempo geológico subsequente, o conteúdo de oxigênio no ar atmosférico atingiu 10% e apareceram os primeiros habitantes

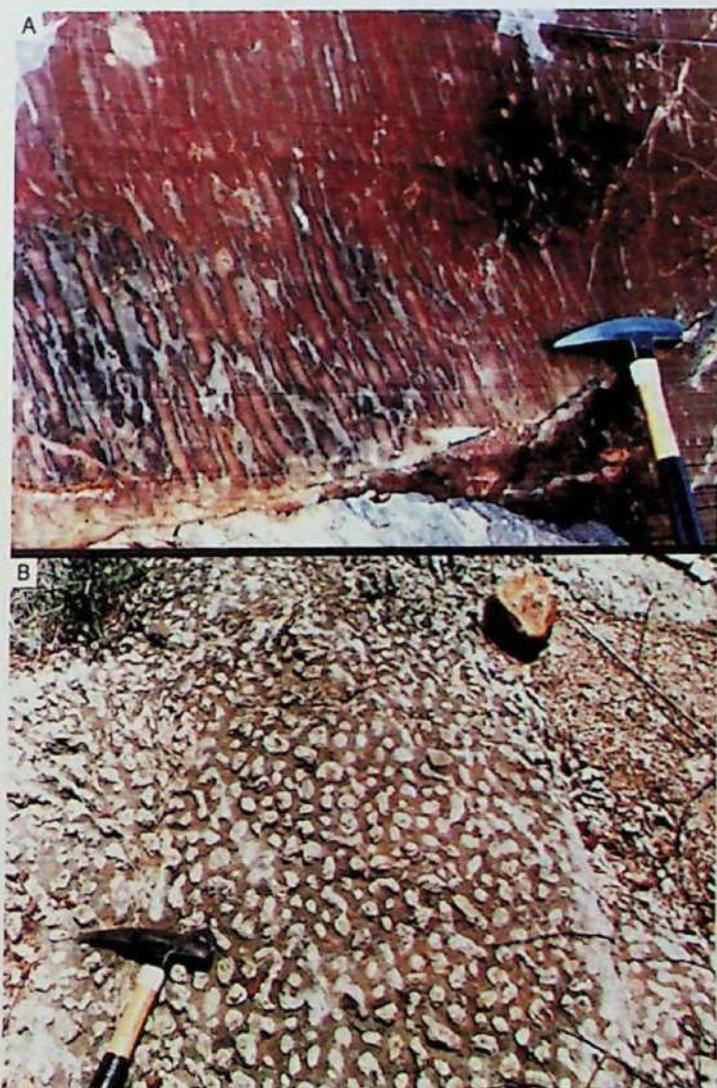


Figura 4: Estromatólitos do Brasil. A) Paleoproterozóico do Supergrupo Minas (Minas Gerais); B) Neoroterozoico do Grupo Una (Bahia).

oceânicos que consumiam oxigênio. Ao atingir o Período Cambriano há cerca de 550 milhões de anos passados, a algumas dezenas de espécies preexistentes foram acrescidas mais de 10.000 espécies de novos seres vivos, durante o evento conhecido como “grande explosão cambriana”, quando surgiram diversos filos atuais, possivelmente até os cordados (Figura 6). Várias hipóteses tentam explicar a causa de tão espetacular evolução orgânica mas, até o momento, não se conhece a verdadeira razão. Poderia eventualmente ser explicada pela fragmentação do supercontinente Gondwana ocorrida há 570 milhões de anos, isto é, apenas 20 milhões de anos antes da “grande explosão

cambriana” ou devido aos nichos ecológicos ainda não terem sido ocupados. Os seres vivos da “grande explosão cambriana” foram espetacularmente preservados na “Fauna de Burgess” (Figura 6E). Esta fauna é encontrada em folhelho de cor cinza escura do Cambriano médio das Montanhas Rochosas do Canadá, onde aflora em encosta situada a 2.600 m de altitude. Devido ao acesso difícil, só foi estudado em 1966, embora seja conhecido desde 1910. As características litológicas e faunísticas deste folhelho sugerem que o paleoambiente de circulação limitada e, portanto, pobre em oxigênio teria sido imprópria à vida da maioria das bactérias. Este fato poderia ter contribuído

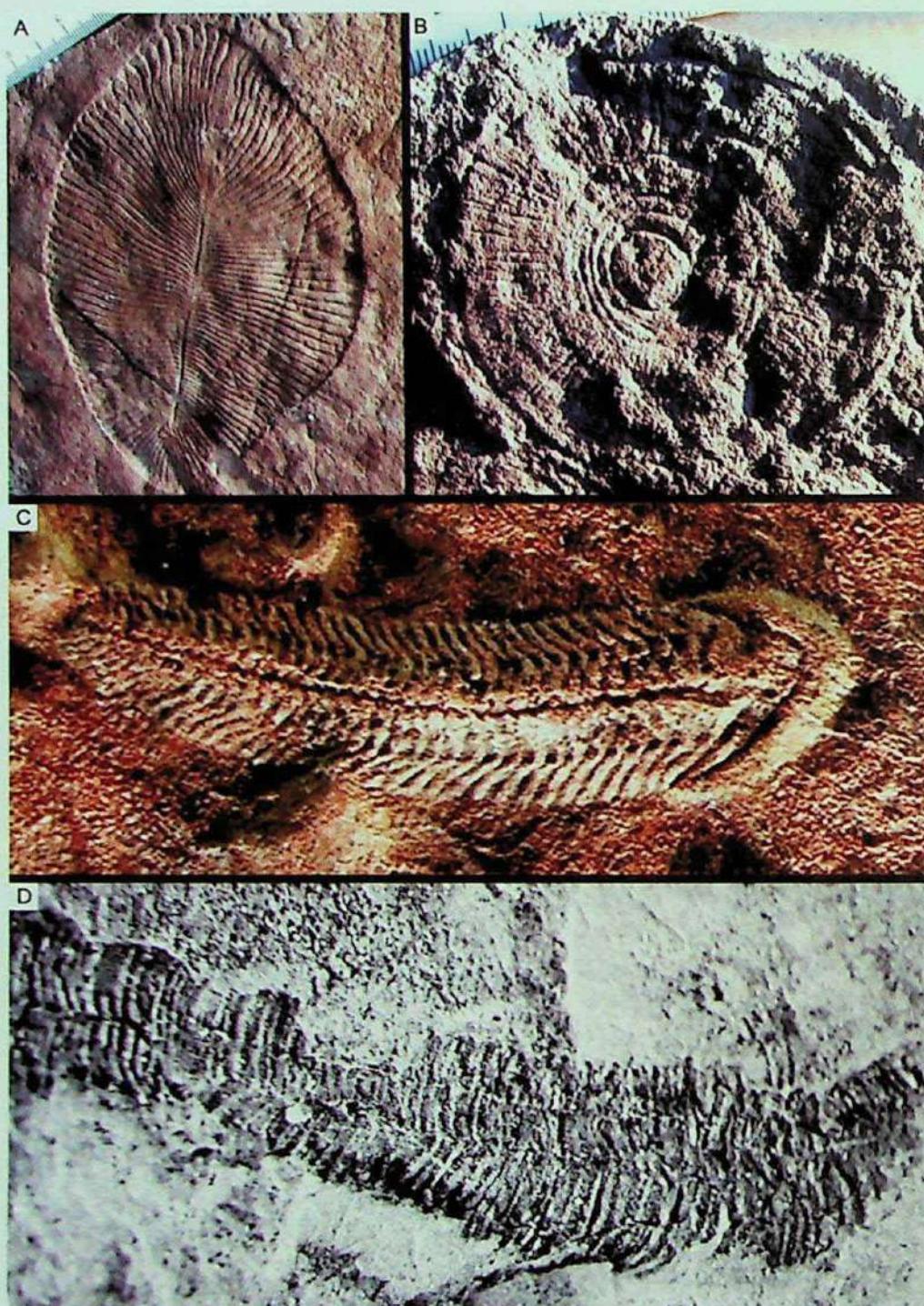


Figura 5: Espécimes da “Fauna de Ediacara”, que apesar de muito antiga é constituída por formas de animais que evoluíram através dos tempos geológicos e acham-se representadas até hoje. A) *Dickinsonia costata*; B) *Cyclomedusa cropped*; C) *Spriggina flounensi*; D) *Corumbella werneri*, descrita em Mato Grosso do Sul (Brasil). Créditos: A, B e C: Wikipedia (<http://www.wikipedia.org/>).

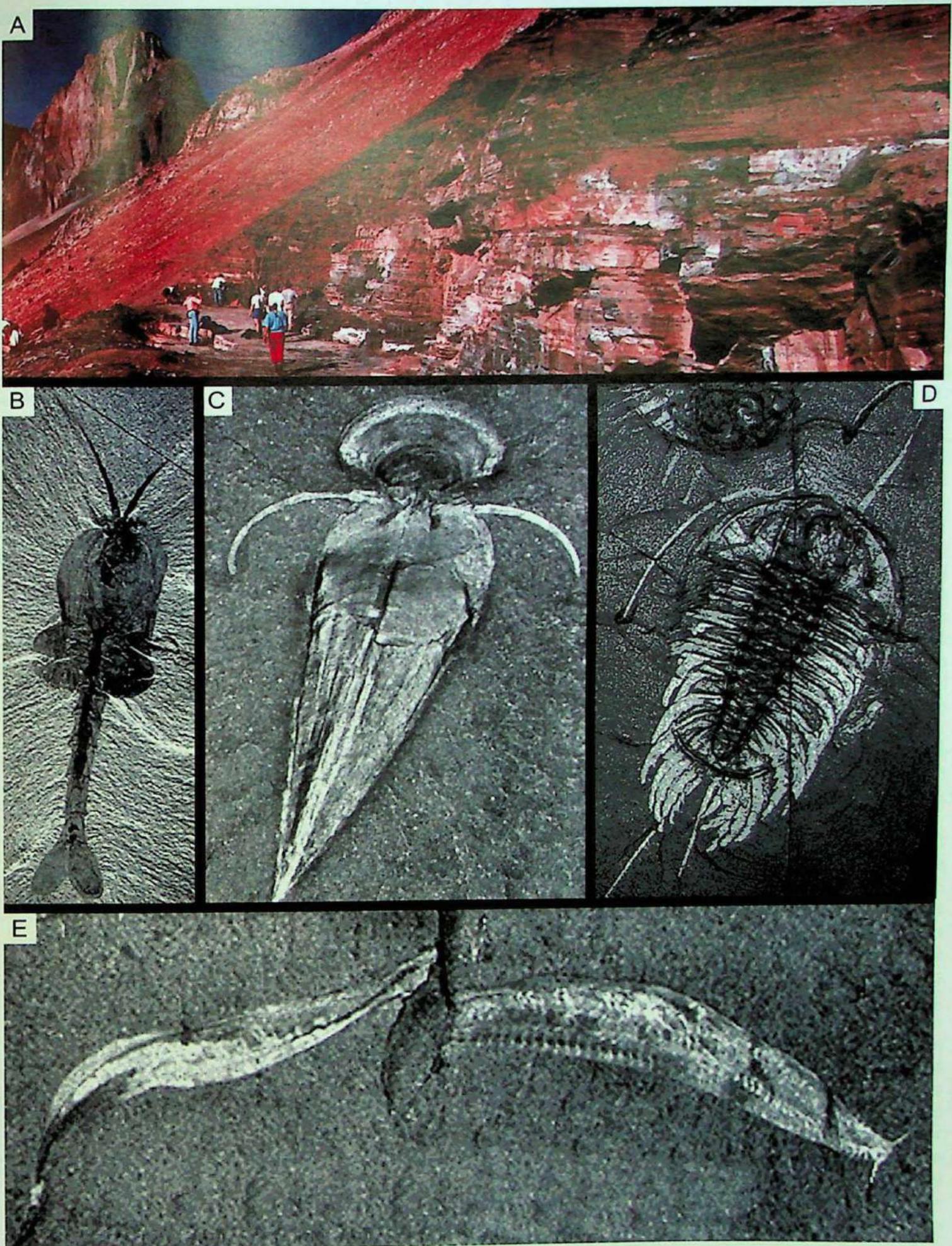


Figura 6: A) "Folhelho Burgess" na Pedreira Walcott (Field, Columbia Britânica, Canadá). Espécimes da "Fauna de Burgess" representativa da "grande explosão cambriana": B) *Waptia fieldensis*; C) *Haplophrentis carinatus*; D) *Olenoides serratus*; E) Reconstrução de *Pikaia gracilens*. Créditos: A- disponibilizado por Andrew MacRae em http://www.geo.ucalgary.ca/~macrae/Burgess_Shale/; B, C, D e E- Smithsonian National Museum of Natural History.

para a boa preservação dos fósseis.

Entre 300 e 400 milhões de anos, em meados da Era Paleozóica, apareceram os grandes peixes e as plantas terrestres. No fim da Era Paleozóica teria ocorrido a propagação de plantas terrestres superiores, exemplificadas pelas cicadáceas. O teor de oxigênio atmosférico teria sofrido acréscimo acentuado e a camada de ozônio, que bloqueia os raios ultravioletas, teria começado a movimentar-se ativamente, dando ensejo ao surgimento de formas primitivas de animais vertebrados sobre os continentes. Na porção superior da Era Mesozóica, que compreende os períodos Jurássico e Cretáceo, entre 250 e 65 milhões de anos, houve o clímax de desenvolvimentos dos dinossauros.

Por outro lado, existem várias teorias para possível explicação da extinção (desaparecimento total) dos dinossauros no fim da Era Mesozóica. Até hoje, uma das mais aceitas é a relacionada ao impacto de meteorito. Investigações recentes sugerem que, no Jurássico médio, o campo magnético terrestre teria estado extremamente enfraquecido, fato que poderia ter intensificado a queda de meteoritos. Hoje em dia, são também freqüentes as discussões sobre a possível influência da dinâmica crustal da época sobre esses acontecimentos.

Atualmente constata-se uma nova tendência ao enfraquecimento de intensidade do campo magnético terrestre. Em função da taxa atual de ocorrência deste fenômeno, poder-se-ia supor que dentro de 1.500 anos estaria reduzida a zero, pois nos últimos 100 anos o decréscimo desta intensidade teria sido de 5%. Porém, não há nada assegurado sobre esta possibilidade, nem sobre a possível influência deste fenômeno sobre os seres vivos e sobre a dinâmica crustal.

Após a Era Mesozóica tem-se a Era Cenozóica, que compreende os últimos 65 milhões de anos, quando ocorreu um impressionante progresso na especialização de mamíferos, que culminaria com o surgimento do ser humano.

GRANDES EXTINÇÕES DOS SERES VIVOS Por diversas vezes, os diferentes seres vivos da Terra estiveram à beira da extinção, porém lograram escapar e sobreviver até os dias atuais. Como já foi mencionado os primeiros seres vivos da Terra, representados por formas de vida constituídos de células primitivas e ainda sem núcleo celular, surgiram há 3,8 bilhões de anos. Somente há 1 bilhão de anos, surgiram os seres multicelulares oceânicos.

De acordo com o relógio biológico, uma extensa reorganização do genoma foi concluída há 900 milhões de anos, e a evolução da vida moderna no Cambriano ocorreu somente depois que os teores de oxigênio e nutrientes em lagos continentais aumentaram a ponto de criar um ambiente enriquecido em Ca^{2+} , Fe^{2+} , V, Mo, HCO_3^- , fosfatos e outros elementos necessários para a construção do esqueleto e de ossos dos primeiros animais modernos, além da radiação cósmica que exerceu um controle significativo sobre a mutação genética (Maruyama & Santosh 2008).

Entre 1.000 e 542 milhões de anos, no final do Proterozoico, a Terra foi congelada em pelo menos duas vezes por glaciações globais: no Sturtiano (715-680 Ma) e no Marinoano (680-635 Ma). As glaciações são eventos muito significativos, pois causaram mudanças revolucionárias na

evolução de formas de vida (Figura 7). Episódica diminuição de gases-estufa ocorreu através de erosão e intemperismo, promovidos, tanto pela origem de montanhas, quanto pelo incremento de costas com a separação de grandes massas de continentes (Figura 8). Efeitos sobre o planeta teriam sido causados por mudanças nas geleiras, erupções de grandes volumes de derrames de basaltos ou redução drástica da obliquidade da eclíptica do planeta, que podem causar a extinção em massa e as “idades do gelo”. Após a glaciação do Marinoano surgiram os primeiros grandes animais multicelulares da “Fauna de Ediacara”, que se extinguiram logo após sem deixar “descendentes”.

Atualmente são reconhecidas seis crises na vida dos seres vivos, que foram denominadas “extinções em massa”, durante os períodos geológicos Cambriano, Ordoviciano, Devoniano, Permiano, Triássico e Cretáceo. Limitações genéticas, catástrofes e mudanças ambientais (Figura 9) são argumentos freqüentemente empregados para explicar as causas ou os padrões de “extinções em massa”.

A primeira crise na vida dos seres vivos do Período Cambriano teria ocorrido há 510 bilhões de anos, quando os trilobitas representativos da “Fauna de Burgess” iniciaram repentina evolução e assumiram várias formas. Segundo vários pesquisadores, a crise desta época teria sido deflagrada, por alguma razão ainda desconhecida, com empobrecimento em oxigênio das águas oceânicas, que poderia ter sido a causado as extinções.

Há 440 milhões de anos, no Período Ordoviciano sobreveio a segunda crise, quando a superfície terrestre foi invadida por enormes geleiras, que causaram a extinção de 57% da vida marinha (Sepkoski 1989). Teria havido um resfriamento global, que desencadeou glaciações e com drástica redução do nível oceânica, que causou, a morte de varias espécies de invertebrados marinhos (briozários, braquiópodes, trilobitas, equinodermes, corais e peixes ostracoderme).

No Período Devoniano, há cerca de 370 milhões de

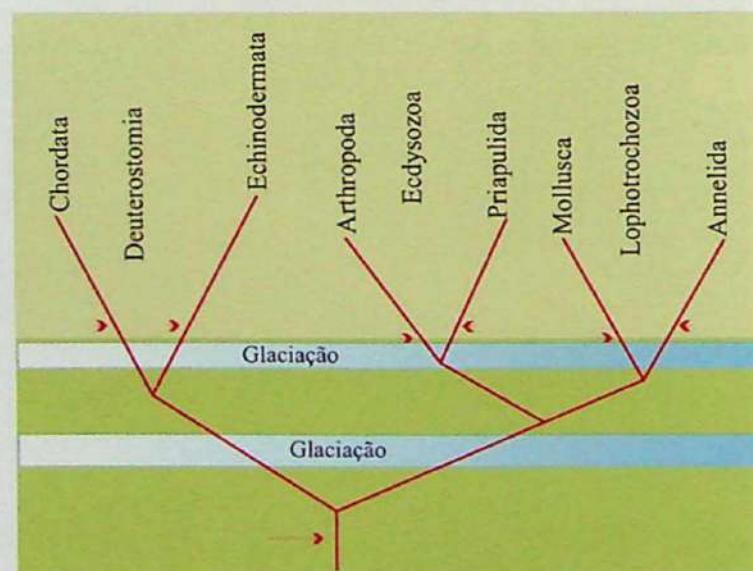


Figura 7: Relação temporal entre duas fases de glaciação que ocorreram no Neoproterozoico (eventos do Sturtiano e Marinoano) e o inicio de intensa aceleração no processo de evolução biológica dos principais filos no Cambriano (Runnegar 2000).

anos, teria havido novo resfriamento global, que causou a morte de 75% das espécies viventes dos quais 50% dos gêneros marinhos (McGhee 1995).

No fim da Era Paleozóica, entre os períodos Permi-

nano e Triássico há cerca de 250 milhões de anos, teria havido talvez a maior crise, que se iniciou com a morte das trilobitas, mas cerca de 90% dos seres vivos e 96% das espécies marinhas foram aniquilados. Como possíveis causas podem ser relacionadas a falta de alimento ou aumento de carbono na atmosfera (Benton 2003), as glaciações ou as atividades vulcânicas na Sibéria, mas também poderia estar ligada à fragmentação do Supercontinente Pangéia, que poderia ter produzido, como na fragmentação do Supercontinente Gondwana, profundas modificações nas ecossistemas.

Embora as faunas paleozóicas tenham passado por trágicas extinções, as faunas mesozóicas e cenozóicas tornaram-se ainda mais prósperas e mais numerosas, quando alguns pesquisadores reconheceram a “revolução marinha mesozóica”. Portanto, a diversificação da vida terrestre atual poderia ter sido, de algum modo, proprietária pela grande extinção sofrida pela fauna paleozóica.

Logo depois do início da Era Mesozóica, há cerca de 210 milhões de anos, teria havido a “quase extinção” dos répteis do Período Triássico, considerada como o evento de menor impacto na vida terrestre quando houve extinção de 48% dos gêneros viventes (Sepkoski 1989). Pouco depois houve a eliminação parcial de moluscos (bivalves e cefalópodes), alguns peixes (agnatha) e conodontes dos oceanos. Como causa dessas extinções pode ser considerada a desertificação mundial, que ocorreu neste intervalo de tempo. Os sedimentos continentais do Período Triássico exibem extensa ocorrência de camadas vermelhas (*red beds*), que são comuns em desertos quentes. A desertificação afetou somente os animais terrestres, mas a fauna marinha mesozóica permaneceu ilesa e contribuiu para o exuberante desenvolvimento dos seres vivos pós-mesozóicos.

A última grande extinção em massa ocorreu no fim do Período Cretáceo há 65 milhões de anos, quando correu a eliminação de 17% de todas as famílias e 50% de todos os gêneros viventes de animais da época (Figura 10).

ORIGEM DO SER HUMANO Segundo idéias vigentes até poucos anos, o surgimento o antropóide de posição ereta, considerado como possível antepassado do ser humano, teria ocorrido há cerca de 3 milhões de anos e, tanto o surgimento como a evolução durante grande parte da sua existência nos primórdios, teriam se processado no continente africano.

Entretanto, hoje em dia, entre os restos de hominídeos mais antigos que 3 milhões de anos, podem ser citados os de *Australopithecus afarensis* (Etiópia e Tanzânia), de *Australopithecus aramensis* (Etiópia) e de *Orrorin tugenensis* (Quênia). Finalmente, em julho de 2002 teria sido encontrado na África Central (Deserto de Djourab, Chade), um crânio de hominídeo com cerca de 7 milhões de anos de idade, que representaria o mais antigo ancestral do homem até agora conhecido, ao qual foi atribuída a denominação de *Sahelanthropus tchadensis*.

Portanto, a árvore genealógica do homem, modificada pelas descobertas recentes, seria composta de seguintes eventos:

- Entre 8 e 7 milhões de anos – Ocorreu a divisão

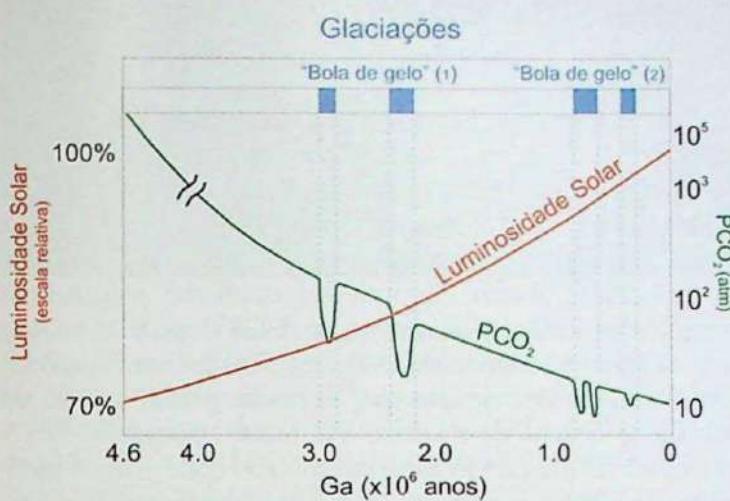


Figura 8: Modelo do incremento do gás-estufa CO₂ na atmosfera. Ao longo da história da Terra, a luminosidade solar aumentou de menos de 30% há 4,6 bilhões de anos até o valor atual. Para compensar a falta de luminosidade no início da Terra, era necessária a abundância de CO₂ (Kasting 1993). Para explicar os episódicos aparecimentos de glaciações de escala global, torna-se necessário admitir episódios de esgotamento de CO₂ na atmosfera (Maruyama & Santosh 2008).

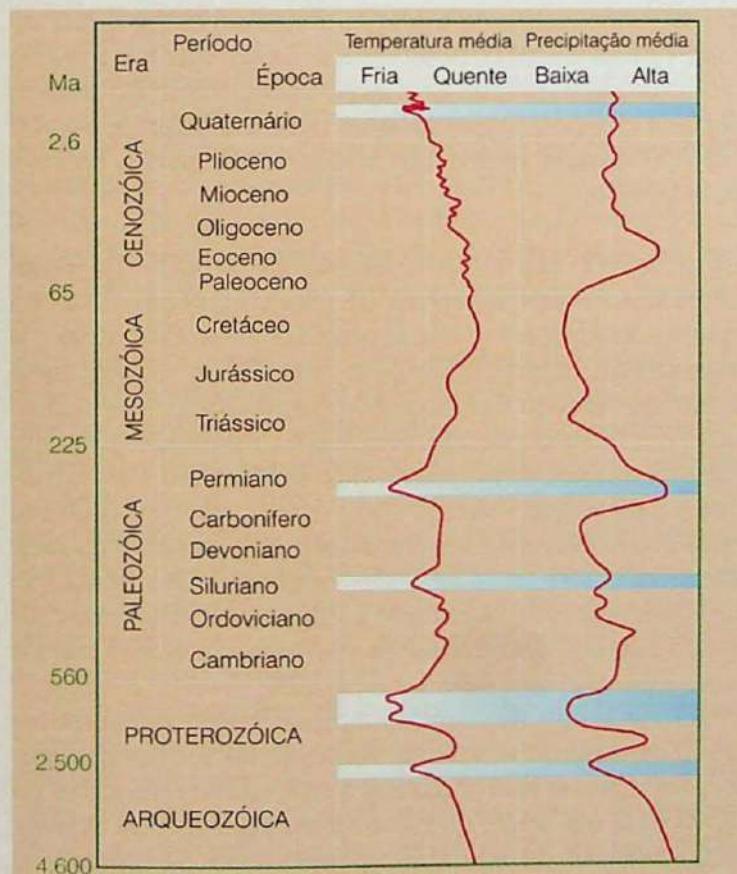


Figura 9: Curvas de variações das temperaturas e precipitações médias, através da história da Terra, em relação às condições atualmente vigentes, com indicações das principais glaciações.

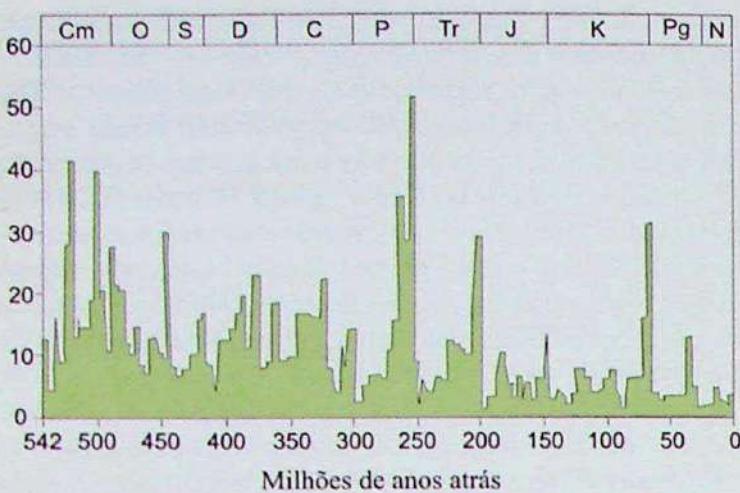


Figura 10: Freqüência de extinção, em porcentagens de gêneros de animais, conforme registros fossilíferos até agora conhecidos.

dos hominídeos em dois ramos, representados pelo do chimpanzé e do homem;

b) 7 milhões de anos – Apareceu o *Sahelanthropus tchadensis*, que representa o mais antigo ancestral do homem, conhecido até o momento;

c) 5,8 milhões de anos – *Orrorin tugenensis* foi o primeiro hominídeo, até agora conhecido, a andar em pé;

d) 4 milhões de anos – Na região desértica da Etiópia foram descobertos ossos de uma menina, que viveu há 3 milhões de anos e pertenceu à mesma espécie de Lucy, que é um fóssil encontrado em 1974. Recebeu a denominação de *Australopithecus afarensis* e constitui o mais famoso dos fósseis de hominídeos, que supostamente representa um ancestral direto do homem moderno;

e) 2,5 milhões de anos – Surgiu o *Homo habilis*, que teria sido o primeiro-hominídeo a desenvolver o uso de instrumentos líticos (rochas e minerais);

f) 1,8 milhão de anos – Teria surgido o *Homo erectus*, que seria o primeiro hominídeo a dominar o fogo, que passaria a ser uma “poderosa arma” de caça e guerra;

g) 1,5 milhão de anos – Até recentemente pensava-se que o *Homo habilis* teria dado origem ao *Homo erectus*. Entretanto, a descoberta de uma mandíbula da primeira espécie e de um crânio da segunda, ambas com mesmas idades, leva à conclusão da possível coexistência das duas espécies durante cerca de 500 mil anos e isso eliminaria a hipótese de que *Homo habilis* represente única espécie ancestral do homem moderno.

h) 600 a 100 mil anos – Este intervalo de tempo é representado pelo *Homo heidelbergensis*, que há cerca de 100 mil anos passados teria dados origem ao *Homo neanderthalensis*, que viveu entre 150 mil e 30 mil anos passados, quando ocorreu a sua extinção. O *Homo sapiens* que surgiu há cerca de 100 mil anos, também originário do *Homo heidelbergensis*, teria originado o homem moderno.

As pesquisas mais recentes têm mostrado também, que durante cerca de 60 mil anos, entre 135 mil e 75 mil anos passados ocorreram longas e severas secas na África, que levaram à redução de populações da espécie humana à beira da extinção, quando restaram cerca de 2 mil habi-

tantes sobreviventes. Entretanto, como resultado da revolução tecnológica a partir do Paleolítico superior, houve aumento populacional até cerca de 400 mil habitantes há 40 mil anos passados. No mundo moderno, representado por uma população mundial de cerca de 6,5 bilhões de habitantes, que conquistaram padrões de bem-estar material inéditos na história da humanidade, torna-se assaz difícil imaginar, que o ser humano já esteve à beira da extinção na pré-história.

Graças ao aumento populacional ocorrido há cerca de 40 a 50 mil anos passados, *Homo sapiens* aventurou-se por continentes fora da África. Deste modo, teria atingido a Ásia há 60 mil, a Oceania há 50 mil, Europa há 35 mil e, por último, as Américas através do Estreito de Behering. Recentemente foram encontrados quatorze fragmentos fossilizados de fezes humanas de 14.000 anos atrás em uma caverna no Estado de Oregon (EUA), além de cordas feitas com tendões de animais, fibras de plantas, peles de animais e estacas de madeira. As fezes continham DNA mitocondrial indicando forte parentesco com grupos indígenas da Sibéria e leste da Ásia. Estes novos dados comprovaram que os primeiros norte-americanos teriam vindo da Sibéria (Thomas et al. 2008).

No Brasil, Peter Lund encontrou entre 1835-1844 na região de Lagoa Santa (MG) restos humanos pré-históricos que teriam vivido há 12.000 anos atrás (Figura 11), denominado posteriormente como Homem de Lagoa Santa, além de cerca de 115 espécies de animais como o tigre de dente-de-sabre (*Smilodon populator*). Artefatos coletados em Rio Claro (SP) associados ao homem pré-histórico indicam idades de 14.000 anos AP. Na década de 1970 foi encontrado um crânio de mulher, na Gruta da Lapa Vermelha (MG), denominada Luzia, que teria vivido há 11.500 anos AP. Novas descobertas em São Raimundo Nonato (PI) apontam para idades mais antigas entre 50.000 e 40.000 anos AP (Pessis & Guidon 1992), para o homem pré-histórico.

EXTINÇÃO HUMANA SUBSEQUENTE À DOS DINOSAUROS Apesar de poucos sobreviventes de répteis continuarem a sua evolução até os dias atuais, o “superastro” representado pelo dinossauro extinguiu-se no fim do Período Cretáceo há 65 milhões de anos, pelo provável “inverno de impacto”. Esta hipótese explicaria o desaparecimento do dinossauro em função do resfriamento global, que teria sido provocado pela queda de um gigantesco meteorito na Península de Iucatã (México). Este evento teria colocado em suspensão tal quantidade de poeira, que teria obliterado completamente os raios solares, causando diminuição da temperatura superficial do planeta em algumas dezenas de graus.

Na Península de Iucatã, admitido como provável local de impacto do meteorito, foram feitas muitas perfurações submarinas profundas em 1985, com o patrocínio do ODP (sigla em inglês do Ocean Drilling Project). Apesar da constatação de mudanças paleoclimáticas repentinas, como de aquecimento global por gases do efeito-estufa, a causa direta de desaparecimento por resfriamento ainda não foi esclarecida.

Outra teoria tenta explicar esta extinção por mudança



Figura 11: Fósseis humanos pré-histórico do Brasil: A - Crânio do Homem de Lagoa Santa (MG), descoberto por Peter Lund em 1843 (Museu de História Natural e Jardim Botânico da Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG); B - Reconstituição fisionômica de Luzia, que teria vivido há 11.500 anos AP na região de Lagoa Santa (MG).

no ecossistema vegetal, com a evolução dos gimnospermas para angiospermas, isto é, os dinossauros herbívoros (saurópodes), que se alimentavam principalmente de gimnospermas, teriam ficado sem alimento. De qualquer modo, a retirada de cena dos dinossauros, deixou o caminho livre para o maior desenvolvimento dos mamíferos na Era Cenozóica.

Portanto, como algumas das principais causas das grandes extinções, podem ser considerados os eventos de resfriamento global da Terra. Eles poderiam ser gerados pela dinâmica crustal ligada à fragmentação de supercontinentes ou por “inverno de impacto” de grandes meteoritos. As condições de anoxia, favoráveis à geração de combustíveis fósseis, como petróleo e gás natural, não parecem ter influído decisivamente na extinção dos seres vivos. Parece que os seres vivos extinguiram-se, quando as mudanças paleoambientais, ultrapassaram as capacidades de adaptação desses organismos.

Entretanto, é possível que a extinção dos grandes mamíferos, ocorrida entre 10 mil e 20 mil anos passados, parece ter seguido um padrão distinto das demais extinções. Esses mamíferos possuíam desde o tamanho de um lobo até bem maiores, como o bicho-preguiça gigante, o tigre dente-de-sabre e o mamute. A extinção desses animais parece ter sido causada diretamente pelo ser humano. As baleias, que representam os animais vivos, encontram-se atualmente em situação de perigo de extinção em função de intensa caça predatória.

O comportamento verdadeiramente irracional do ser humano, que não respeita as leis da natureza, pode ser ilustrado por inúmeros exemplos (Figuras 12 e 13). Ele causa o desmatamento de florestas tropicais pluviais, desenvolve atividades que expelem o dióxido de carbono com queimadas ou através de queima de combustíveis fósseis e causa a exacerbção do processo de aquecimento global com o efeito-estufa antrópico. Além disso, contamina a Terra com resíduos tóxicos e radioativos e causa

mudanças na camada de ozônio, que protege os seres vivos contra os efeitos maléficos de certas radiações solares. Além disso, através da manipulação genética cria novos seres sem, ao menos, questionar sobre as consequências deste ato.

O ser humano, que se comporta com esta onipotência jamais vista em qualquer outro ser vivo sobre a superfície terrestre poderá ver-se, em futuro próximo, submetido a crises e situações nunca antes experimentadas. Elas poderão manifestar-se sob as formas mais diversas como, por exemplo, guerras e epidemias avassaladoras causadas por escassez de recursos naturais (comida, água e combustíveis fósseis).

O cerne da questão está na explosão demográfica, que no fim do século XX já ultrapassava 6 bilhões de habitantes, com probabilidade de atingir 10 bilhões em futuro próximo. A continuidade do processo neste rumo e ritmo pode conduzir a população humana do planeta Terra a duas probabilidades, quais sejam, destruição parcial ou extinção. Na primeira, pode-se admitir a destruição parcial e a



Figura 12: *Raphus cucullatus*, o extinto “Dodô”, era uma ave que viveu há 200 anos nas Ilhas Maurício. Foi extinta depois de caçados por seres humanos, que destruíram as florestas onde eles habitavam, segundo reconstituição do Museu de História Natural da Universidade de Oxford.



Figura 13: *Bufo periglenes*, o extinto "sapo dourado" ou "sapo-de-monteverde" da Costa Rica que devido as mudanças climáticas devido ao aquecimento global desapareceu aproximadamente em 1989.

evolução do restante, que saltaria para um estágio superior ao atual, para continuar o seu progresso. Na segunda, após a extinção do ser humano, poderia ocorrer uma repentina evolução a partir de uma origem completamente diferente. Quando comparados aos momentos de prosperidade e decadência pós-cambrianas dos seres vivos, a segunda alternativa poderia ser a mais plausível.

Tem sido observado que, quanto mais acentuada a eliminação, maior tem sido a prosperidade atingida pelos sucessores. Este fato foi constatado, tanto na "grande explosão" de vida no Período Cambriano, como na "revolução marinha" da Era Mesozóica. Sob esta óptica, de acordo com os exemplos, a extinção da humanidade não deveria ser encarada como um fato somente negativo para o progresso da Terra!

EXTINÇÃO PLEISTOCÉNICA NO BRASIL No Brasil, os estudos referentes à extinção por motivos paleoclimáticos ou pela ação do homem são incompletos. Há poucos estudos arqueológicos e os estudos paleoclimáticos são ainda inconclusivos.

A história dos mamíferos sul-americanos está diretamente relacionada aos longos intervalos de isolamento geográfico, mas a maior peculiaridade está relacionada à existência de esporádicas rupturas deste isolamento e a um processo migratório transcontinental. No Cretáceo Inferior, o supercontinente Gondwana estava isolado da Laurásia, e aqui se diferenciaram mamíferos que se extinguiram na passagem do Cretáceo para o Paleógeno. No Paleoceno Inferior a conexão do Gondwana com a Laurásia foi restabelecida e emigraram para a América do Sul os primeiros mamíferos marsupiais e placentários. Durante parte do Paleógeno e Neógeno a América do Sul esteve

isolada novamente e ocorreu a primeira diferenciação dos mamíferos. A primeira fase de isolamento foi interrompida pela entrada dos roedores há 35 milhões de anos, quando possivelmente imigraram macacos durante a conexão com a África. No segundo estágio de isolamento ocorreu muita mudança taxonômica e ecológica até 4 a 3 milhões de anos quando houve a restauração do Istmo do Panamá.

Os grupos que se dispersaram entre as Américas eram mamíferos adaptados à savana, além dos atuais carnívoros e ungulados que são descendentes dos animais norte-americanos que chegaram nesta época. Os restos de mamíferos pleistocênicos extintos são encontrados em todo o Brasil (Cartelle 1994), porém são mais freqüentes na região Nordeste, em cacimbas e cavernas. No Rio Grande do Sul e parte de Santa Catarina, os fósseis pleistocênicos são encontrados nas proximidades das praias, lançados pelas ondas, que retrabalham os sedimentos submersos da Formão Chuí, pertencentes ao Sistema Laguna/Barreira III (Souza-Cunha et al. 1992). Os outros jazigos paleontológicos são pontuais e dispersos e não permitem a reconstituição da evolução dos mamíferos no Brasil.

EXTINÇÃO DO PLANETA TERRA Necessariamente, tudo que tem um começo também terá um fim. Sabe-se que os elementos radioativos do interior da Terra (urânio, tório e potássio-40) representam as fontes de calor, que são imprescindíveis à dinâmica interna do planeta, mas certamente irão desaparecer. Deste modo, a energia geotérmica e o campo magnético deixarão de atuar. Em consequência disso, os raios cósmicos nocivos aos seres vivos da Terra, inclusive aos humanos, atingirão direta e incessantemente a superfície terrestre.

É extremamente complicado prognosticar a evolução humana, mas os fenômenos geológicos exógenos (externos) e endógenos (internos), exemplificados pelo intemperismo e sedimentação ou pelo vulcanismo e orogênese, que vem ocorrendo há bilhões de anos, ainda prosseguirão por muito tempo. As sucessivas erupções vulcânicas poderão evaporar e decompor a água do interior da Terra que, ao tornar-se mais escassa, poderá interferir nos volumes das águas oceânicas e fluviais. Dois temas que preocupam a humanidade contemporânea são a desertificação e o esgotamento de recursos hídricos, que não são causadas pelos eventos geológicos supracitados, mas principalmente pelo consumo crescente e desperdício excessivo pelo homem.

As atividades evolutiva da Terra e da vida têm prosseguido graças às constantes mudanças cíclicas na superfície terrestre, cuja cessação significa a "morte" do planeta. Por outro lado, a vida terrestre depende do Sol que, daqui a 900 milhões de anos poderá expandir-se e aumentar em 20% a intensidade do seu calor. Nesta situação poderá ocorrer evaporação total dos oceanos e o planeta se converterá em uma "estrela sem vida". Após cerca de 5 bilhões de anos, o Sol poderá converter-se em estrela gigante avermelhada, que engolirá a Terra e levará ao desaparecimento de todo o Sistema Solar.

Porém, o intervalo de tempo envolvido até o provável colapso total do Sistema Solar é demasiadamente longo em relação à efêmera vida humana e até mesmo conside-

rando-se o momento de surgimento do primeiro hominídeo conhecido, de apenas 7 milhões de anos. Desta maneira a única atitude racional do ser humano contemporâneo deve consistir na preservação da qualidade do seu ambiente de vida, pois conforme T. de Chardin "A Terra não precisa de nós, mas para nós ela é imprescindível".

Referências

- Algeo, T.J. & Ingall, E. 2007. Sedimentary C_{org}:P ratios, paleocean ventilation, and Phanerozoic atmospheric pO₂. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **256**: 130-155.
- Benton, M.J. 2003. When life nearly died: The greatest mass extinction of all time. Thames and Hudson, London, 336 p.
- Cartelle, C. 1994. *Tempo passado: mamíferos do Pleistoceno de Minas Gerais*. Belo Horizonte, Ed. Palco, 131 p.
- Cattermole, P. 1995. Earth and Other Planets: Geology and Space Research. Oxford University Press, USA. 160 p.
- Kasting, J.F., 1993. Earth's early atmosphere. *Science* **259**: 920-926.
- Kitano, Y. 1995. Ciência da água. Tóquio, NHK Books 729 (em japonês).
- Maruyama, S. & Santosh, M. 2008. Models on Snowball Earth and Cambrian explosion: A symp. Gondwana Research, in press. doi:10.1016/j.gr.2008.01.004
- McGhee Jr, G.R. 1995. The Late Devonian mass extinction: The Frasnian/Famennian crisis. Columbia University Press, New York, 378 p.
- Pessis, A.M. & Guidon, N. 1992. A área arqueológica de São Raimundo Nonato. In: Araújo, A.J. & Ferreira, L.F. (eds). *Paleopatologia e paleoepidemiologia*. Estudos Multidisciplinares. Rio de Janeiro, Editora Panorama, p. 111-120.
- Runnegar, B. 2000. Loophole for Snowball Earth. *Nature*, **405**: 403-404.
- Sallun Filho, W. & Fairchild, T.R. 2005. Estromatólitos no Brasil – Um passeio pelo passado no shopping. *Ciência Hoje*, **37**(222): 22-29.
- Sepkoski Jr, J.J. 1989. Periodicity in extinction and the problem of catastrophism in the history of life. *J Geol Soc London*, **146**: 7-19
- Souza-Cunha, F.L.; Bergqvist, L.P. & Capilla, R. 1992. Cetáceos fósseis e sub-recentes da Coleção de Paleovertebrados do Museu Nacional. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, **64**, 3: 277-288.
- Thomas, M.; P. Gilbert, Jenkins D. L., Götherstrom A., Naveran N., Sanchez J. J., Hofreiter M., Thomsen P. F., Binladen J., Higham T. F. G., Yohe R. M., Parr R., Cummings L. S., Willerslev E. 2008. DNA from Pre-Clovis Human Coprolites in Oregon, *North America*. *Science*, **320**(5877): 786 – 789.

PROMOÇÃO



PATROCINADORES - DIAMANTE

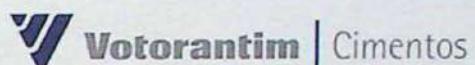
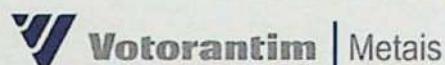


PATROCINADORES - OURO



Ministério de
Minas e Energia

Secretaria de Geologia,
Mineração e Transformação Mineral



PATROCINADORES - PRATA



Companhia
Editora Nacional



Desenvolvimento com Responsabilidade



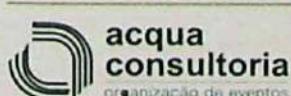
Conselho Nacional de Desenvolvimento
Científico e Tecnológico



APOIO



ORGANIZAÇÃO





Livros Textos publicados pela Sociedade Brasileira de Geologia

1. Hardy Jost & José Affonso Brod - Como redigir e ilustrar textos em Geociências (2005)
2. Nolan Maia Dehler & Rômulo Machado - Introdução aos conceitos de transpressão e transtracção e exemplos de cinturões transpressivos (2006).
3. Marek Chvátal - Tradução de Igor de Abreu e Lima - **Mineralogia para principiantes, cristalografia** (2007).
4. Ismar de Souza Carvalho & Antonio Carlos Sequeira Fernandes - Icnologia (2007).
5. Marcos A. L. do Nascimento, Ursula A. Ruchkys e Virginio Mantesso - Neto - Geodiversidade, Geoconservação e Geoturismo - Trinômio importante para a proteção do patrimônio geológico (2008).

ISBN 978-85-99198-08-7

9 788599 198087