

As ciências da Terra e a sociedade: as necessidades para o século XXI

W. S. FYFE

O SÉCULO XX tem sido notável em termos do desenvolvimento do *Homo sapiens*. Estimou-se que, há dois mil anos, a população humana era de 300 milhões. Foram então necessários 1.700 anos para dobrar a população: conflito social, doença, fome controlaram a população do globo. Depois vieram o nascimento da ciência moderna e da tecnologia e o início de novo conhecimento sobre nosso planeta. Os gigantes do período em torno de 1900 (desde Lyell até Darwin e Einstein) inauguraram novas visões que incluíam a compreensão dos átomos, da energia e dos sistemas planetários. Vivemos agora na era da observação em todas as escalas. A aplicação impensada do novo conhecimento levou à presente explosão populacional. Para muitos, a qualidade de vida melhorou muito, mas hoje estamos preocupados e seguindo o famoso relatório Bruntland (*World Commission on Environment and Development*, 1987), a nova reflexão do conceito de desenvolvimento sustentável.

Atualmente, a maioria concorda que a população humana mundial, hoje de cerca de seis bilhões, irá dobrar nos próximos 30-40 anos. Mas será um mundo com uma nova demografia. Por volta de 2050, a Europa e a América do Norte representarão uma pequena parte da população mundial. A maior expansão populacional ocorrerá nas assim chamadas nações em desenvolvimento (ou sub-desenvolvidas). As atuais taxas de fertilidade parecem corroborar tal afirmação (Índia, 3.8; Nigéria, 6.5; Egito, 3.9; Paquistão, 6.22; Alemanha, 1.3; Itália, 1.3; Suécia, 2.1).

Dados mundiais recentes demonstram os problemas crescentes da superpopulação; áreas importantes como Ásia e África com imensos problemas de desnutrição (Sadik, 1989) e demais problemas associados à desnutrição. A expansão de doenças clássicas como tuberculose, malária, entre outras, e com crescente competição por recursos, conflitos muitas vezes brutais em cerca de 40 nações.

Um novo sintoma da situação presente é a ascensão dos assim chamados refugiados ambientais, os *expulsos do Éden*. Conforme escreveu Fell (1996) recentemente: “As multidões de refugiados escapando das inundações, estiagem, desertificação e outras agressões contra o meio ambiente poderiam inchar para 200 milhões por volta de 2050. Haverá alguma esperança de impedir a catástrofe global?”

A superfície do nosso planeta será muito diferente por volta do ano 2100. Durante as décadas passadas, testemunhamos o crescimento da ciência ambiental. Estudamos em detalhe as mudanças no meio ambiente nos últimos 100 mil anos aproximadamente e reconhecemos muitos dos fatores do sistema Sol-atmosfera-hidrosfera-biosfera-Terra sólida que levaram a flutuações em muitas escalas temporais. Nosso ambiente nunca esteve, nem jamais estará, em estado de equilíbrio.

Mas acho que, na qualidade de cientistas da Terra, devemos ser honestos. O passado não será a chave para se compreender o novo mundo. Por exemplo, imaginemos nosso planeta quando:

- bem poucos rios fluíam livremente até os oceanos – cerca de 5.300 grandes represas em 1950, 36.000 em 1985 (Abramovitz, 1996);
- muitas nações não têm florestas;
- a irrigação nos continentes levará a novos padrões de evaporação global – novos regimes de água continental, salinização etc.;
- os solos globais tornaram-se mais delgados e menos bioprodutivos;
- maior quantidade de produtos químicos xenobióticos, pesticidas, herbicidas etc. cobrem o planeta;
- a biodiversidade foi grandemente reduzida e espécies geneticamente modificadas cobrem a terra.

Em termos globais, nosso planeta terá novas química e biologia da geosfera externa, um novo albedo.

Será a melhor a qualidade de vida média por volta de 2050? Muitas vezes penso que a principal questão a ser abordada por todas as pessoas cultas deveria ser: “poderá este planeta sustentar bem 10-12 bilhões de seres humanos e deixar o planeta em ordem para todos aqueles que virão depois de nós?” Acho que a resposta a essa pergunta agora está clara. Pode ser possível – mas não com as presentes tecnologias e moralidade social. Fico irritado quando leio reportagens recentes sobre as disparidades cada vez maiores nos rendimentos auferidos pelas pessoas. Em 1960, a razão entre os 20% mais ricos da população e os 20% mais pobres era de 30 vezes; hoje, cresceu para mais de 60 vezes. Sim – a *globalização* ou, como dizem alguns, *feudalismo corporativo* está funcionando.

Desejo, a seguir, tecer considerações sobre alguns dos novos desenvolvimentos urgentemente necessários; a maioria deles envolve, em parte, as ciências da Terra. É difícil colocar tais desenvolvimentos em alguma ordem de prioridade pois todas estão inter-relacionadas.

Prioridade um – educação de qualidade universal

Quando pensamos na condição humana, as situações nas quais os ambientes estão melhorando com verdadeira mudança rumo a sistemas sustentáveis, os dados mundiais são claros (veja *World Resources Institute Report*, 1996-97). Nas nações com educação excelente e cada vez melhor para todos, em todas as faixas etárias,

os problemas estão sendo resolvidos e a sociedade humana aceitando seu lugar na biosfera e no planeta. Como já se afirmou muitas vezes, precisamos de uma educação universal em alfabetização, em números e em ciência. Todos aqueles que vivem num planeta do sistema solar, ainda que o único disponível, devem compreender como ele funciona, quais os fatores que controlam os sistemas que dão suporte à nossa vida. Embora há muito se reconheça a necessidade de saber ler e escrever, não há dúvida de que igual prioridade deve ser dada à educação universal de ciência. E é possível usar o sistema planetário para introduzir os conceitos mais básicos da ciência (a dinâmica matéria-energia) para as pessoas de todas as idades e estágios. Devemos educar para a responsabilidade global (Fyfe, 1992a). Todas as pessoas devem compreender que as condições neste planeta nunca estão em estado de equilíbrio. Devemos estar preparados para surpresas e isso significa que devemos ter excedentes.

Nos níveis avançados, nas universidades, é chegada a hora de produzir uma integração muito maior dos campos especializados. Sim – precisamos ter especialistas de todas as espécies. Mas, hoje, devemos ter especialistas que consigam se comunicar com outros especialistas e não se escondam por trás de seu jargão. Recentemente, reli um antigo relatório da Unicef (1963) afirmando que, por volta de 1970, a malária deixaria de existir no planeta. Parte considerável do auxílio estrangeiro fornecido aos países em desenvolvimento foi na forma de DDT. Mas os especialistas estavam enganados, não compreenderam a ecologia nem a evolução da doença. Sob o título de ciência ambiental, precisamos de interações das diversas áreas da física, química, biologia, geologia, engenharia, sociologia e economia.

Algumas prioridades nas ciências da Terra

Desenvolvimento do mapa geológico

Mais do que nunca, é necessário um mapeamento geológico altamente preciso, em escalas apropriadas aos problemas de desenvolvimento em consideração. Tais mapas devem ser exatos em descrever a cronologia dos eventos e devem ser exatos em três dimensões. Por exemplo, se considerarmos o crescimento das megacidades, o conhecimento geológico necessário para prevenir-reduzir os custosos erros de engenharia (como ocorreu em Kobe, Japão), para suprir e proteger a água, prevenir a poluição etc., tornam-se necessários níveis de detalhe e alcance muito maiores do que os da maioria dos atuais sistemas de mapeamento. Estudos recentes, como com o experimento alemão de perfuração profunda (KTB), mostram claramente que, hoje, nossas técnicas para sensoriamento remoto profundo estão longe de ser as mais adequadas. Recentemente, fiz uma viagem de campo com um excelente grupo de geólogos estruturais portugueses da Universidade de Lisboa. Eles estavam preocupados com o mapeamento de região de certo interesse em termos de um sítio para o descarte de lixo nuclear. A região era bem conhecida por algumas grandes estruturas com falhas. Mas seus estudos detalhados revelaram claramente a complexidade dos padrões de estresse e evidenciaram a presença de sistemas de microfalhas com uma distribuição de frequência de dezenas de metros. Esse tipo de detalhe é essencial para o planejamento de qualquer grande projeto de engenharia. Em recente encontro realizado na Noruega, geólogos suecos

apresentaram um relato sobre o uso de bons mapas no planejamento do local exato das novas rodovias, resultando em grandes reduções de custo. À medida que as regiões urbanas se expandem, é necessário levar em consideração o uso da subsuperfície para instalações de armazenamento, construção de fábricas, rotas de transporte etc. A superfície de nosso planeta tem grande valor, com seu papel na produção de alimentos e fibras e para a bioprodutividade em geral.

Os mapas geológicos devem incluir a química da superfície (relacionada ao potencial agrícola) e o armazenamento de água nos poucos quilômetros superiores. Trabalho recente financiado pela União Internacional de Ciências Geológicas e pela Unesco mostrou a enorme importância do mapeamento geoquímico da superfície para inúmeros problemas, desde a agricultura até a saúde pública e o descarte de lixo (veja Darnley, 1995).

Controle de qualidade de materiais

Temos hoje técnicas incríveis para a descrição de todos os materiais: inorgânicos; biológicos em todas as fases e estados – gasoso, líquido e sólido; e para o estudo de superfícies. Antes de qualquer material ser usado e dispersado em nosso planeta, precisamos ter o conhecimento exato de o quê ele é e como reage com as geosferas externas. Como será discutido adiante, os materiais terrestres são usados e dispersos em vasta escala e muitas vezes sua química e demais aspectos são estudados depois dos problemas que causam. Algumas de nossas especializações clássicas, como mineralogia e petrologia, devem ser consideradas as ciências dos materiais naturais da Terra, no mais amplo sentido.

Energia

No presente momento, o grosso da energia mundial origina-se da combustão de carvão, petróleo e gás; esses recursos baseiam-se em capital natural e não são sustentáveis. O desperdício irrefletido de tais valiosos recursos constitui um desastre global. Das fontes de carbono fóssil, somente o carvão e certos tipos de sedimentos ricos em carbono têm reservas de interesse para mais de algumas décadas. De modo geral, houve pequena mudança na tecnologia da combustão – adicionar ar, queimar e lançar gases para a atmosfera.

Não há necessidade de discutirmos aqui os impactos potenciais futuros das mudanças climáticas relacionados com o fato de termos alterado rapidamente a química da atmosfera. A discussão geralmente está centralizada no CO_2 , CH_4 e compostos ácidos, mas, como anteriormente enfatizado (Fyfe & Powell, 1995), muitos carvões contêm quantidades significativas de todos os halogênios (*F*, *Cl*, *Br*, *I*) e a catástrofe da crescente depleção de ozônio pode ser influenciada pela queima desses combustíveis. Muitos carvões têm quantidades significativas de elementos como o urânio e o arsênio, além de uma série de metais pesados imobilizados no meio redutor rico em enxofre do carvão. É impressionante como se conhece tão pouco sobre a química detalhada e a química de fase desse importante combustível mundial.

Imaginemos por um momento que não tivéssemos utilizado o carbono fós-

sil, nuclear, em nossos sistemas de energia. Se dependêssemos somente do vento, da água, da biomassa, quantas pessoas viveriam na Terra?

Os Estados Unidos e nações como a China e a Índia dependerão do maior uso do carvão nas décadas por vir. Poderá a tecnologia ser mudada a um custo razoável, para reduzir o impacto ambiental da combustão do carvão? Acho que a resposta é afirmativa. Temos estudado a fixação do CO_2 e de compostos orgânicos nos basaltos rachados e permeáveis nas cavernas do Kauai, Havaí, à grande profundidade de cerrada cobertura florestal. Toda fissura está coberta com materiais brancos (sílica, argila, carbonatos), formados pela ação da matéria orgânica com o basalto, um processo mediado pela ubíquas biopelículas bacterianas. As bactérias conseguem viver em profundidades de mais de 4 km, até a $110^\circ C$, em locais favoráveis (Pedersen, 1994). Poderiam tais processos ser usados para corrigir os gases de escape da combustão do carvão? Certamente alguns tipos de rocha serão melhores que outros e as rochas vulcânicas com feldspato-*Ca* e ricos em fases *Fe-Mg* devem ser ideais, como no Havaí. Além disso, é interessante observar que a adição de H_2O-CO_2 a rochas apropriadas pode constituir um processo altamente exotérmico e o descarte de gases poderia levar a um ganho de energia geotérmica! Para algumas reações, o calor produzido pelo átomo de carbono é de aproximadamente 30% do calor original de combustão por átomo de carbono. Recentemente, numa viagem de campo à China (leste de Pequim), discutimos a possibilidade de utilizar seus campos de petróleo-gás rapidamente explorados para o descarte de lixo de diversos tipos. Se uma bacia consegue isolar petróleo-gás por milhões de anos, sem dúvida terá a capacidade de isolar o lixo (Desseault, 1995). Geralmente, as estruturas dos campos de petróleo e as propriedades hidrogeológicas são bem conhecidas. O interesse nessa área está crescendo rapidamente (veja Fyfe, *et al.*, 1996; Hitchon, 1996).

O crescente conhecimento da biosfera profunda também aumenta a possibilidade, com determinados tipos de sedimentos carbonados, de utilizar microorganismos para a produção *in situ* de metano ou hidrogênio. Em lugar de abrir minas profundas, com todos os problemas relacionados à poluição da água, poder-se-ia produzir biogás *in situ*?

Não há escassez de fontes de energia neste planeta. Em última instância, o mundo precisa mudar para a energia solar de todos os tipos (fotovoltaica, ventos, ondas) e energia geotérmica. O uso da energia eólica está aumentando em todo o mundo e os dispositivos fotovoltaicos estão se tornando mais eficientes e baratos (*New Scientist*, 1995).

As fontes geotérmicas estão normalmente associadas a regiões de elevado fluxo de calor (sistemas vulcânicos), mas, para determinadas finalidades (aquecimento urbano, estufas e sistemas de aquacultura), o gradiente geotérmico normal pode proporcionar o aquecimento de apoio. Existem muitas regiões do solo oceânico com impressionante potencial para a energia geotérmica. Todo esse uso potencial exige o conhecimento exato de estruturas geológicas profundas, porosidade, permeabilidade e geoquímica. Fiquei interessado ao ler, em recente matéria do *Economist*, que existe escassez mundial de silício de elevada pureza. Onde no pla-

neta estaria o SiO_2 mais puro na escala de milhões de toneladas? É com esse tipo de problema que nos devemos preocupar.

Água

Se a população humana mundial chegar a 10 bilhões e para que esses 10 bilhões tenham nutrição adequada e suprimento de água limpa, será necessário gerenciar o suprimento mundial de água com muito cuidado e atenção. Quando estudamos a questão da fonte de água, vemos o potencial para verdadeiras limitações e desastres ambientais em potencial (Postel, 1992, 1996).

Em todo o mundo, a precipitação de água é de cerca de 525.100 km^3 ($1 \text{ km}^3 = 10^{15} \text{ g} = 10^9$ toneladas). Contudo, grande parte dela cai nos oceanos (78%). No solo, mais da metade se evapora. O escoamento confiável e disponível para o homem é de cerca de 14 mil km^3 (ocorre muito mais, porém, durante as enchentes). Estima-se que a água utilizável confiável seja da ordem de 9 mil km^3 . Atualmente, o homem manipula cerca de 3.500 km^3 , quase 40% do total. Depois que o homem utiliza a água, sua química e biologia ficam alteradas (McLaren & Skinner, 1987).

Para qualquer dada região, o suprimento de água pode ser quantificado. Talvez seja mais fácil pensar numa *ilha-modelo* (por exemplo, um rio pode fluir de uma região à outra – mas quem poderá garantir que este influxo – fluxo global – será mantido?) Numa ilha-modelo, o inventário de água inclui: a precipitação de chuva, a penetração de água no solo, a evaporação ou evapotranspiração, o escoamento até os oceanos. Um primeiro e mais importante parâmetro a ser considerado é a confiabilidade, ou variações, da precipitação de chuva. Durante qual período de tempo se deve medir a média da disponibilidade do suprimento total? Os números a serem usados também refletirão, em parte, as tecnologias disponíveis, ou possíveis, para armazenar água durante longos períodos de tempo.

Devem ser observados alguns fatos que ocorrem na natureza ao se preparar um plano de gerenciamento do suprimento de água da ilha:

- o escoamento suficiente para prevenir a salinização – o escoamento remove os sais e outros resíduos da superfície do solo;
- os processos de evaporação dependem da natureza da cobertura superficial da ilha. Esta irá variar, dependendo de vegetação, construções urbanas, sistemas de transporte etc.;
- os recursos de água do solo potencialmente úteis dependem da geologia, da porosidade profunda, da permeabilidade e da natureza química das rochas que influenciarão a química da água e sua adequação às várias finalidades, sejam agrícolas ou industriais;
- o armazenamento superficial remove a área da terra e pode aumentar a evaporação;
- o armazenamento subsuperficial só terá uso sustentável se o reabastecimento exceder a retirada e se o ciclo não reduzir a porosidade e a permeabilidade a longo prazo.

É digno de nota que hoje, em muitas áreas, tais dados básicos não são levados em consideração no uso da água (veja Postel, 1996). Os lençóis freáticos estão sendo minados em muitas regiões.

Há poucas dúvidas de que, em futuro próximo, haverá o desenvolvimento massivo de tecnologias para a reciclagem em massa, para a reutilização da água, particularmente nos sistemas urbanos e industriais. Dado um clima apropriado, o escoamento urbano-industrial seria redistilado por abundante energia solar – uma espécie de tecnologia da espaçonave Terra (imagine uma colônia em Marte!). Pelo uso de rochas apropriadas, a água destilada poderia ser facilmente remineralizada para os níveis necessários de conteúdo mineral para a nutrição humana. Para os usos industriais, modernos sistemas de filtração (inorgânicos ou biológicos) poderiam permitir a reutilização e redução da descarga de água.

Para este autor, porém, um grande problema com o potencial de questões importantes envolve os usos de energia para a agricultura dos principais sistemas de escoamento. Um grande rio é represado para tais fins. O escoamento até os oceanos agora flutua em grandes valores, dependendo das flutuações na precipitação de chuvas. A jusante, a biodiversidade aquática e a biomassa são gravemente perturbadas. Nos locais de descarga oceânica, o suprimento nutricional à biomassa oceânica também é gravemente perturbado e as fotografias tiradas por modernos satélites nos mostram claramente que a biomassa marinha está concentrada próxima às margens continentais.

Mas talvez o mais grave seja que os sistemas de correntes oceânicas poderão também ser perturbados. Há cerca de 10 mil anos, a grande Corrente do Golfo que transporta energia para as regiões árticas do Atlântico foi perturbada. O Norte entrou em pequena Era Glacial, o evento *Younger Dryas*. A explicação dada por Broecker *et al.* (1989) é que, durante algum tempo, o sistema do rio Mississippi foi desviado para o sistema St. Lawrence. Isto colocou um imenso fluxo de água doce continental na superfície do Atlântico norte, perturbando a Corrente do Golfo e o transporte de energia setentrional. Com grande rapidez, o Ártico norte congela. Tal modelo nos adverte que, se um grande efluxo for alterado, os padrões das correntes oceânicas, de mistura oceânica, poderão mudar os efeitos sobre o clima local e global. Contudo, deve-se notar que o modelo de Broecker *et al.* foi recentemente questionado (Vernal *et al.*, 1996). Tais fenômenos devem ser levados em consideração quando existirem planos para modificar componentes importantes do escoamento continental! Tenho certeza de que a maioria dos engenheiros hídricos nunca levou em consideração tais possibilidades.

Finalmente, precisamos de novas tecnologias para limpar e corrigir as águas poluídas, pois as reações superficiais de compostos inorgânicos, metais pesados, poluentes e sais minerais podem ter grande significado. Assim, elementos como chumbo e mercúrio freqüentemente podem ser seqüestrados por adsorção sobre as superfícies minerais de sulfetos. O urânio e muitos metais podem ser adsorvidos por microorganismos apropriados. Muitas técnicas estão sendo desenvolvidas para aplicações simples de destilação por energia solar para a purificação de águas poluídas e salgadas. Onde a poluição envolve compostos orgânicos tóxicos, novamente

o processamento através de microorganismos apropriados está atraindo crescente atenção. E a possibilidade de utilizar organismos subsuperficiais termofílicas é de grande interesse. Nas regiões quentes onde a evaporação é intensa, devem ser evitados os reservatórios de grandes áreas. Precisamos explorar melhor as estratégias para o armazenamento subterrâneo, ou mesmo uma tecnologia de cobertura inerte. Novas tecnologias de observação, como a do satélite Radar capaz de monitorar a umidade do solo, podem exigir planejamento mais inteligente das indústrias agrícolas, com menor necessidade de irrigação.

Ar

Em todo o mundo existe preocupação crescente com a qualidade do ar e a saúde pública. Por exemplo, estima-se que na Inglaterra (Hamer, 1996) “doenças, mortes e dias de trabalho perdidos causados por poluição particulada custam ao país £ 17 bilhões por ano”. Na Inglaterra, os principais problemas reconhecidos provêm das tecnologias de transporte. Mas um artigo recente de Nriagu (1996) mostra a incrível escala de emissões de metais na atmosfera. Por exemplo, ele demonstra que, hoje, quatro milhões de toneladas métricas de chumbo são emitidas anualmente à atmosfera. À medida que aumentou a mineração de metais, o mesmo aconteceu com as emissões atmosféricas.

Em muitas áreas urbanas (veja *World Resources Institute*, 1996), onde as emissões particuladas estão aumentando, suas fontes e sua natureza raramente são bem caracterizadas. Existe a necessidade urgente de caracterizar-se todas as emissões particuladas e gasosas para desenvolver-se tecnologias para o seu controle. A situação em geral é semelhante àquela do uso de combustível fóssil. Sabemos que existem tecnologias possíveis.

Solo

Neste momento, pelo menos um bilhão de seres humanos não têm suprimento adequado de alimentos de valores nutritivos bem balanceados (Sadik, 1989). Em todo o mundo, a madeira está se tornando uma mercadoria cara e em declínio. Apesar da revolução eletrônica, o uso de produtos de papel está aumentando (o consumo *per capita* triplicou nos últimos 40 anos). Além disso, os recursos marinhos do mundo estão declinando em velocidade alarmante. Uma vez mais, a lacuna existente entre ricos e pobres está aumentando dramaticamente a diferença nutricional na população mundial.

A produção sustentável de alimentos e fibras depende do clima, das flutuações climáticas, da qualidade do solo e dos recursos hídricos; além disso, o conhecimento das geociências está envolvido em todos esses parâmetros. Dado que não estamos fornecendo uma nutrição adequada para a presente população humana, quais seriam as perspectivas para os próximos cinco bilhões?

Todos os organismos exigem grande gama e equilíbrio de elementos químicos (cerca de 50) para a produção eficiente da matéria orgânica necessária à vida (Mertz, 1981). A geoquímica e a mineralogia dos solos são cruciais para estimar a capacidade de um solo para uma produtividade orgânica sustentável. De acordo

com o *Worldwatch Institute*, a perda da camada superior do solo está, em termos globais, próxima de 1% por ano, ao passo que a reparação natural pode levar centenas de anos. Atualmente, existem tecnologias para o controle da erosão e da salinização, mas tais tecnologias não estão sendo usadas adequadamente; existe grande necessidade de novos mapeamentos de solos, que mostrem claramente os bons, os solos somente para florestas e aqueles que deveríamos deixar em paz! (Fyfe, 1989).

Dadas as propriedades químicas e físicas de um solo, os aditivos podem ampliar muito a bioprodutividade. Muitas vezes, tais aditivos exigem a adição de materiais minerais simples contendo espécimes como *K*, *Mg*, *Ca*, *P*, entre outros, e metais apropriados presentes em traços como *Co*, *Mo* etc., que podem ser cruciais em biofunções como a fixação do nitrogênio. Os tipos de aditivos podem estar intimamente ligados aos tipos de solo e de clima. Para muitas situações, como ocorre com os solos lateríticos da região tropical úmida, uma lenta liberação de fertilizantes minerais (*K* em feldspatos, fosfatos de rocha etc.) pode ser mais eficiente e desperdiçar menos que fertilizantes químicos solúveis (veja Konhauser *et. al.*, 1995).

O solo contém complexa gama de materiais inorgânicos e biominerais ultrafinos, com vastas áreas superficiais que controlam as funções cruciais – as biofunções e as funções do solo. Hoje, com as modernas técnicas da química superficial (Auger, Esca, entre outras) e o poder da moderna microscopia eletrônica de transmissão de alta resolução (Tazaki *et. al.*, 1987; Tazaki & Fyfe, 1986), podemos examinar com precisão as interações inorgânico-bio-gás-líquido, que não era possível há uma década. Nos solos, muitos dos processos de formação mineral envolvem reações com células vivas. Existe um novo mundo na ciência da biomineralização que, como mostrou Lowenstam (1981) décadas atrás, tem enorme importância em todos os ambientes aquáticos até pelo menos 100°C.

Atualmente, podemos reduzir enormemente a erosão do solo de todos os tipos. Com frequência, o uso maciço de fertilizantes químicos altamente solúveis não é necessário e frequentemente nossos detritos, como esgotos, esterco, pó de rocha, cinza de carvão etc., podem ser agentes úteis para a correção do solo. Mas em todos esses casos de uso, deve haver estrito controle de qualidade sobre toda a química e microbiologia. Existe crescente número de evidências de que a biodiversidade de fato promove a bioprodutividade (veja Tilman *et. al.*, 1996). A biodiversidade também pode reduzir o impacto das flutuações climáticas como a estiagem.

Nutrientes nos principais rios

(As unidades são dadas em partes por milhão)

Nutrientes Rio	Cálcio	Magnésio	Potássio	Total de
	Dissolvido	Dissolvido	Dissolvido	Sólidos Dissolvidos
Mississipi	39,0	10,7	2,8	265
B. Amazonas	5,2	1,0	0,8	38
B. Negro	0,2	0,1	0,3	6
Ganges	24,5	5,0	3,1	167

Fonte: Berner & Berner, 1987. L. Lower.

Como estimamos a saúde local e regional do solo? Gostaria de sugerir que existem maneiras simples de se obter uma estimativa útil da saúde dos solos em bases local e regional. Todos os organismos, desde bactérias até árvores, exigem uma ampla gama de macronutrientes e micronutrientes. A tabela apresentada mostra os níveis de três importantes macronutrientes em quatro grandes rios do mundo. A maior parte da água desses rios passa através do solo e de rochas superficiais. Os níveis de macronutrientes e o total de material orgânico dissolvido (TDS) falam eloqüentemente sobre o estado dos solos que os rios drenam. Os sistemas dos rios Mississipi e Ganges passam através de solos mais jovens, impregnados de minerais formadores de rochas; os sistemas Amazonas e Negro fluem através de terrenos velhos de laterita. A água do Amazonas indica baixa capacidade de sustentar intensa bioprodutividade, provavelmente o motivo por que a região não foi intensamente povoada pela espécie humana, historicamente.

Materiais: recursos minerais

Se olharmos ao nosso redor, percebemos que estamos cercados por materiais modificados, principalmente derivados do quilômetro superior da crosta terrestre. Vivemos com concreto, vidro betume, cerâmica, aço, cobre, alumínio, pedra, zinco etc. Nossos equipamentos de transporte, nossos computadores, contêm pelo menos um dos componentes da metade dos elementos da tabela periódica. As sociedades avançadas usam cerca de 20 toneladas de materiais derivados de rocha por pessoa, por ano. Para uma população de 10 bilhões vivendo com avançada qualidade de vida, isto significa 2×10^{14} kg de rocha por ano, ou quase 100 km^3 por ano. Tal quantidade excede o volume de todo o vulcanismo no planeta, no solo e submarino, por uma ordem de magnitude. As ações humanas representam agora um importante componente dos processos que modificam as superfícies do planeta (Fyfe, 1995).

Podemos suprir os materiais necessários para toda a humanidade? Se tivermos a energia para alimentar as máquinas e transportar os materiais, a resposta provavelmente será sim. Mas também é evidente que, para os materiais menos comuns, como o cobre, zinco, entre outros, e com rigorosa atenção à reciclagem, é possível reduzir a escala atual de modificações do meio ambiente. A nova tendência de projetar um produto para reciclagem deve se tornar a regra do futuro. As economias no uso total de materiais, no uso de energia, na produção de detritos tornam a reciclagem uma necessidade econômica do futuro.

Importante componente dos materiais que hoje utilizamos deriva da madeira. Fica evidente que os atuais estilos de utilização da madeira em produtos para habitação, papel, pacotes e assemelhados não podem continuar. O impacto ambiental da remoção de florestas é demasiadamente grave para permitir que sejam mantidas as coletas descuidadas do passado e do presente. A madeira não será o material mais importante para os 10 bilhões de seres humanos do próximo século. Ela não é necessária, dado o potencial dos modernos sistemas de construção e comunicação.

Uma vez mais, devo ressaltar que no futuro desenvolvimento dos recursos

minerais, será necessário aperfeiçoar o controle de qualidade. Antes da exploração de qualquer mina, devemos conhecer a mineralogia total de todas as suas fases, a sua química total e o posicionamento químico de todos os seus elementos. E dadas as novas observações sobre a biosfera profunda, existem novas animadoras possibilidades para a mineração *in situ* através da utilização de microorganismos (veja Fyfe, 1996a).

Tecnologias holísticas de mineração

Como já mencionado, para obter os recursos de que necessitam, as sociedades avançadas utilizam cerca de 20 toneladas de rocha por pessoa/ano. A exploração de minas imensas é operada em amplas faixas de profundidade, desde a superfície até vários quilômetros. Por exemplo, em terrenos com solos lateríticos, os minerais comuns podem ser úteis como aditivos de solo na região local; certos tipos de minas podem ser úteis para descarte de lixo. Poderiam algumas minas bem profundas ser úteis para o isolamento de detritos nucleares de altos e baixos níveis? Poderiam algumas minas de metal abertas próximas à superfície ser utilizadas para descarte de lixo urbano? E em alguns casos, dados os detritos orgânicos, poderiam ser manipuladas com materiais apropriados de vedação por argila, para a produção de biogás utilizável?

Todos esses usos potenciais de minas exauridas exigem planejamento holístico, do início ao fim. E muitas vezes a chave para o sucesso está na simples separação de gangas, argila, silicatos minerais, carbonatos e assemelhados. Com cuidado e com a consideração do uso final, seria possível aumentar significativamente a economia da mineração.

Detritos

Os detritos da produção de energia dos combustíveis fósseis são enormes. Não há necessidade de enfatizar aqui o dióxido de carbono e o efeito estufa, nem a chuva ácida resultante da má tecnologia do carvão. Usamos termos como tecnologia *limpa* do carvão. Mas a menos que o dióxido de carbono seja controlado, consideração possível como bem o sabem tantos geoquímicos, a combustão de carvão é suja, ou muito suja. As conseqüências econômicas e sociais, mesmo as causadas por pequena mudança climática ou elevação no nível do mar, são simplesmente impressionantes. Precisamos de economia holística.

Entretanto, embora as emissões de gases da queima de combustível (CO_2 , CO , SO_x , NO_x etc.) sejam conhecidas, outro grande problema é o descarte de cinzas. Temos trabalhado na Índia, onde é usado carvão com elevado índice de cinza (10-50%), levando a enorme problema com o seu descarte. O carvão é um material de composição química altamente variável e pode conter concentrações significativas de elementos como cromo, arsênio, chumbo, urânio, entre outros. Mas o carvão pode conter elementos úteis como potássio e fósforo. A cinza que esteja em estado reativo, freqüentemente cristalino, pode ser tóxica para o ambiente. No presente, despejar o lixo nos rios é, com freqüência, o método de descarte, criando problemas graves, como inundações. Em termos globais, o descarte de

cinzas é um problema cada vez maior, já que pelo menos um km³ é produzido anualmente. A mineração de carvão em larga escala, muitas vezes associada à oxidação de sulfetos do carvão e lixívia de metais raros, pode perturbar os recursos de superfície e os recursos de lençol freático.

Há décadas atrás, parecia possível que a energia nuclear conseguiria resolver os problemas de energia do mundo. Hoje, contudo, estamos preocupados. Embora existam possibilidades (veja Krauskopf, 1988), o problema do descarte de lixo nuclear ainda não foi claramente resolvido (Fyfe, 1996b). Ainda existe potencial de energia hídrica em larga escala em alguns continentes, como a África e a América do Sul. Há a tendência de se considerar a geração de eletricidade por energia hídrica como ambientalmente benigna. Mas experiências recentes, por exemplo, no Amazonas do Brasil, mostram que nem sempre é assim. Os vales fluviais são freqüentemente grandes produtores de alimento e floresta. A menos que a topografia seja escarpada, várias áreas poderão ficar inundadas, florestas e terrenos cultivados serem alagados e criado um paraíso para doenças tropicais de veiculação hídrica. Há crescente interesse em biocombustíveis (metano, etanol, metanol) e o Brasil lidera o mundo nesse recurso potencialmente renovável (açúcar → etanol) derivado da energia solar. Uma vez mais, porém, cuidado; os biocombustíveis usam o solo. O mundo enfrenta importante problema de nutrição inadequada para todos (Sadik, 1989). A menos que haja preciso controle do equilíbrio de nutrientes no solo, tal tecnologia poderá não ser sustentável. Se as regiões agrícolas mais produtivas do mundo fossem usadas para biocombustíveis, quem teria a reserva de alimento para “o ano sem verão”? (Grove, 1988).

Numa recente Conferência Dahlem (McLaren & Skinner, 1987), discutiu-se sobre o impacto dos metais pesados e dos compostos orgânicos xenobióticos que inundam os modernos sistemas solo-água-atmosfera em escalas sempre crescentes. São usados, atualmente, pelo menos 50 mil compostos orgânicos, que podem não ter análogos naturais e cujo comportamento ambiental é pouco conhecido. Cada vez mais, existem mudanças no sentido de eliminar a dispersão, de fazer a contenção e, no caso dos compostos orgânicos, de destruir por incineração. No mundo rico, as regulamentações e controles são bem mais desenvolvidos (o sistema do rio Reno, por exemplo); em boa parte do mundo em desenvolvimento, entretanto, há ainda pouco controle. Os impactos de compostos químicos desconhecidos sobre a ecologia – local e global – são pouco compreendidos, mas dados recentes da Europa ocidental são alarmantes (veja *World Resources Institute*, 1996). A influência global de um grupo de compostos químicos simples sobre a destruição do ozônio ilustra muito bem o impacto daquelas que eram antes consideradas substâncias químicas inofensivas.

Não há necessidade de enfatizar o impacto sobre solo, água, ar, equilíbrio ecológico; da superutilização de fertilizantes químicos, herbicidas e pesticidas que, atualmente, é cada vez mais reconhecido. Por outro lado, os limites da lavoura *orgânica* também são reconhecidos. Foi demonstrado que, se fosse utilizada apenas a lavoura orgânica, uma área de terra muito maior seria necessária para alimentar a presente população mundial. A urbanização removeu qualquer esperança de

uma dispersão silenciosa. Cidades de 20 milhões de habitantes serão comuns no próximo século. Para onde irá o lixo?

Lentamente, estamos voltando a antigos sistemas de reciclagem e reutilização. Todos os resíduos, animal e vegetal, transformam-se, com cuidado, em bons fertilizantes ou, em alguns sistemas, podem ser utilizados para gerar metano e hidrogênio (Baccini, 1989). A chave de todas as tecnologias de reciclagem para economizar energia é o controle de qualidade desde o seu início. Se caracterizarmos bem todos os materiais que servem de insumo para a indústria, então será mais econômico reciclar eficientemente os resíduos. Provavelmente sabemos mais sobre elementos presentes em traços na lua do que sobre o lixo urbano. Aterros deveriam ser o último recurso – não podemos nos dar ao luxo de desperdiçar terra. E há crescente interesse na agricultura urbana. Podemos produzir alimento e reduzir o lixo nas cidades (veja Nelson, 1996).

Conclusão

Os dados mundiais são graves (veja *World Resources Institute*, 1996). Nas nações com elevado nível de educação e de liberdade de informação, os índices de natalidade estão caindo e as pessoas aceitando limites ao crescimento. Algumas emissões de gases também estão sendo reduzidas dramaticamente (na Alemanha, por exemplo, o equivalente a 3743×10^3 toneladas métricas de SO_2 em 1970 foi reduzido para 939×10^3 toneladas em 1990) e em muitos países está sendo demonstrado que a reciclagem é economicamente positiva.

É também óbvio que, para o novo desenvolvimento pretendido, precisamos de novos sistemas para integrar o conhecimento necessário (veja King & Schneider, 1991). Por exemplo, a maioria das nações em desenvolvimento precisa de mais energia. Quem deve participar do planejamento dos novos desenvolvimentos? Quais são as alternativas e a economia de longo alcance? Com certeza os biólogos, ecologistas, agrocientistas, engenheiros, hidrogeólogos, cientistas do sistema terrestre em geral, muitos da física avançada, química, ciência dos materiais, todos trabalhando com planejadores sociais e economistas. E essas pessoas devem participar do planejamento desde o início! Talvez Tickell (1993) tenha resumido tudo quando afirmou: “Recentemente me perguntaram se eu era otimista ou pessimista. A melhor resposta foi dada por outra pessoa: disse que tinha o otimismo do intelecto, mas o pessimismo da vontade”. Em resumo, temos a maior parte dos meios para enfrentar os problemas que surgem à nossa frente, mas somos nitidamente modestos em nossa disposição de usá-los. Nunca é fácil transformar o longo prazo em curto prazo. Nossos líderes, talvez na política dos negócios, raramente têm um horizonte temporal de mais de cinco anos.

Há motivo para otimismo. Na década de 40, Aldous Huxley disse que temos tratado a natureza com ganância, violência e incompreensão. Mas, hoje, a incompreensão não é mais escusável. Há necessidade de abordagem totalmente nova para os megaproblemas e a chave para o sucesso é a combinação da ciência com uma economia sensata. A superfície deste planeta e nossos sistemas de hidrosfera, atmosfera, biosfera devem ser administrados com grande cuidado, se quisermos que todas as pessoas desfrutem sua experiência no planeta (Fyfe, 1992b).

Temos muitos estudos recentes para mostrar que a proteção ambiental é economicamente vantajosa. *Eco*-logia e *eco*-nomia (do grego *Oikos*, minha casa) não entram em conflito quando a unidade da escala de tempo é a década. Está na hora de mudar, em nossas universidades, muitos de seus programas e reconhecer as necessidades para o mundo de 2050.

Referências bibliográficas

- ABRAMOVITZ, J.N. Imperiled waters, impoverished future: the decline of freshwater ecosystems. *Worldwatch Paper*, n. 128, p. 80, 1996.
- BACCINI, P. *The landfill*. Berlim, Springer-Verlag, 1989.
- BERNER, E.K. & BERNER, R.A. *The global water cycle*. New Jersey, Prentice Hall Inc., 1987.
- BROECKER, W.S.; KENNETT, J.P. & FLOWER, B.P. Routing of meltwater from the laurentide ice sheet during the Younger Dryas cold episode. *Nature*, n. 41, p. 318-321, 1989.
- DARNLEY, A.G. *A global geochemical database for environmental and resource management*. Darnley *et al.*, (eds.), Unesco Press, 1995, p. 122.
- DESSEAULT, T.M.B. Radioactive waste disposal. *Nature*, n. 375, p. 625, 1995.
- FLAVIN, C. & LEUSSEN, N. Worldwatch Institute, *Paper n. 100*, 1990.
- FELL, N. Outcasts from Eden. *New Scientist*, p. 24-27, 31 ago. 1996.
- FYFE, W.S. Soil and global change. *Episodes*, n. 12, p. 259-254, 1989.
- _____. *Global change: real time geochemistry in facets of modern geochemistry*. Springer-Verlag, 1989, p. 31-38.
- _____. Education for global responsibility. *International Newsletter on Chemical Education*, n. 36, dez. 1991, 1992a.
- _____. The life support system in danger: challenge for the earth sciences. Japão, *Earth Sciences*, v. 47, n. 3, p. 179-201, 1992b.
- _____. Global anthropogenic Influences. *Encyclopedia of Environmental Biology*, v. 2. Academic Press Inc., p. 203-214, 1995.
- _____. The biosphere is going deep. *Science*, n. 273, p. 448, 1996a.
- _____. Energy and wastes: from plutonium to carbon dioxide. *Science International, Newsletter*, n. 62, p. 14-17, 1996b.
- FYFE, W.S. & POWELL, M.A. Halogens in coal and the ozone hole, Letter to the editor. *Chemical Engineering News* (American Chem. Soc.), p. 6, 24 abr. 1995.
- FYFE, W.S.; LEVEILLE, R.; ZANG, W. & CHEN, Y. Is CO₂ disposal possible? *Am. Chem. Soc. Division of Fuel Chemistry*, v. 41, n. 4, p. 1433-1435, 1996.
- GROVE, J.M. *The little ice age*. London, Methuen, 1988, p. 498.
- HAMER, M. Clean air strategy fails to tackle traffic. *New Scientist*, p. 6, 31 ago. 1996.

- HITCHON, B. *Aquifer disposal of carbon dioxide*. Alberta, Canadá, Geoscience Publishing Ltd., 1996.
- KING, A. & SCHNEIDER, B. *The first global revolution*. London, Simon & Schuster, 1991.
- KONHAUSER, K.O.; FYFE, W.S.; ZANG, W.; BIRD, M.I. & KRONBERG, B.I. Advances in Amazonian biogeochemistry. SEIDL, P.R.; GOTTLEIB, O.R. & KAPLAN, M.A.C. (eds.) *Chemistry of the Amazon*. Am. Chem. Soc. Symposium Series, 1995, p. 558.
- KRAUSKOPF, K.B. *Radioactive waste disposal and geology*. London, Chapman & Hall, 1988.
- LOWENSTAM, H.A. Minerals formed by organisms. *Science*, n. 211, p. 1126-1131, 1981.
- McLAREN, D.J. & SKINNER, B.J. *Dahlem conference reports*. New York, John Wiley, 1987, p. 940.
- MERTZ, W. The essential trace elements. *Science*, n. 213, p. 1332-1338, 1981.
- NELSON, T. Closing the nutrient loop. *Worldwatch*, v. 9, n. 6, p. 10-17, 1996.
- NEW SCIENTIST. Cheap solar power, p. 11, 14 jan. 1995.
- NRIAGU, J.O. A history of global metal pollution. *Science*, n. 272, p. 223-224, 1996.
- PEDERSEN, K. The deep subterranean biosphere. *Earth Science Reviews*, n. 34, p. 243-260, 1994.
- POSTEL, S. *Last oasis-facing water scarcity*. New York, W.W. Norton and Co., 1992, p. 239.
- _____. Dividing the waters: food security, ecosystem health, and the new politics of scarcity. *Worldwatch Paper*, n. 132, p. 76, 1996.
- SADIK, N. *The state of world population, 1989*. New York, United Nations Population Fund, U.N., 1989, p. 34.
- TAZAKI, K. & FYFE, W.S. Observations of primitive clay precursors during microcline weathering. *Contrib. Min. Pet.*, n. 92, p. 86-90, 1986.
- TAZAKI, K.; FYFE, W.S. & IWATZAKI, M. Clues to Arctic soil erosion from cryoelectron microscopy of smectite. *Nature*, n. 333, p. 245-247, 1987.
- TICKELL, Sir Krispin *The future and its consequences*. London, The British Association Lectures, The Geological Society, 1993, p. 20-24.
- TILMAN, D.; WEDIN, D. & KNOPS, J. Productivity and sustainability influenced by biodiversity in grassland ecosystems. *Nature*, n. 379, p. 718-720, 1996.
- VERNAL, A. De; HILLAIRES-MARCEL, C. & BILODEAU, G. Reduced meltwater outflow from the Laurentide ice margin during Younger Dryas. *Nature*, n. 381, p. 774-777, 1996.
- WORLD COMMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT. *Our common future*. Oxford, Oxford University Press, 1987.
- WORLD RESOURCES INSTITUTE. *World resources 1996-97*. Oxford, Oxford University Press, 1996.

RESUMO – No próximo século, quando a população mundial chegar a 10-12 bilhões, haverá, deverá haver, um vasto desenvolvimento dos recursos da Terra. Se quisermos ter um desenvolvimento verdadeiramente sustentável, deveremos usar todo o conhecimento sobre nosso planeta com maior sabedoria que no passado. Deveremos integrar todo o conhecimento para solucionar problemas críticos, como o abastecimento de energia, a segurança alimentar, o gerenciamento dos detritos e a manutenção da qualidade do ar e da água para todas as espécies que vivem conosco e nos sustentam. O conhecimento das Ciências da Terra está no cerne do desenvolvimento inteligente dos nossos sistemas de sustentação da vida.

ABSTRACT – As world population moves to 10-12 billion next century, there will be, must be, vast development of Earth Resources. If there is to be truly sustainable development, we must use all knowledge about our planet with greater wisdom than in the past. We must integrate all knowledge to solve critical problems like energy supply, food security, waste management and the maintenance of quality air and water for all species who live with us and support us. Knowledge from the Earth Sciences is the core of intelligent development of our life support systems.

W.S. Fyfe é professor do Departamento de Ciências da Terra, Universidade de Ontário, Canadá. Trabalhou nas universidades da Califórnia (Berkeley), Manchester e Western Ontario. Foi presidente da União Internacional de Ciências Geológicas de 1992 a 1996. Fellow da Royal Society de Londres, Royal Society da Nova Zelândia, Sociedade Geológica da América e do Clube de Exploradores de Nova York.

No dia 9 de outubro de 1996, o autor fez a palestra *O sistema Terra e o desenvolvimento futuro dos recursos naturais para a sociedade*, no auditório do Instituto Oceanográfico da USP, dentro do Ciclo Comemorativo do décimo aniversário do IEA-USP.

O autor agradece a contribuição da comunidade geológica e do governo da China pela organização do 30º Congresso Ecológico Internacional em Beijing, realizado em 1996. Considera não haver dúvida de que, em todo o mundo, novas idéias e nova cooperação resultarão desse congresso, no qual se discutiu a maioria dos mais urgentes problemas.

Tradução de Vera de Paula Assis. O original em inglês – *The earth sciences and society: the needs for the 21st century* – encontra-se à disposição do leitor no IEA-USP para eventual consulta.