

293

UNIVERSIDADE  
**AbERTA**  
PORTUGAL UNIVERSIDADE PÚBLICA  
DE ENGINHO A DISTÂNCIA  
[www.univ-ab.pt](http://www.univ-ab.pt)  
EM QUALQUER LUGAR DO MUNDO



# GEOLOGIA E AMBIENTE — RECURSOS GEOLÓGICOS

MARIA DA CONCEIÇÃO FREITAS

ISBN: 978-972-674-579-2

Maria da Conceição Freitas

# **GEOLOGIA E AMBIENTE – RECURSOS GEOLÓGICOS**

**Universidade Aberta**

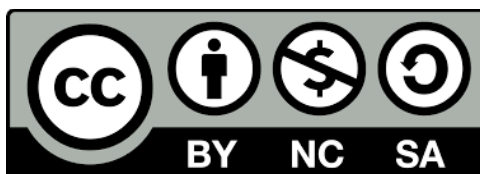
2005

Capa: Mina de S. Domingos (fotografia do autor).  
Arranjo gráfico: José Manuel Dias.

Copyright © **UNIVERSIDADE ABERTA** — 2005  
Palácio Ceia • Rua da Escola Politécnica, 147  
1269-001 Lisboa – Portugal  
[www.univ-ab.pt](http://www.univ-ab.pt)  
*e-mail*: [cvendas@univ-ab.pt](mailto:cvendas@univ-ab.pt)

TEXTOS DE BASE; N.º: 293

ISBN: 978-972-674-579-2





## **MARIA DA CONCEIÇÃO FREITAS**

Licenciada em Geologia, em 1984, pela Universidade de Lisboa, completou o Mestrado em Geologia Económica e Aplicada em 1989 e obteve o Grau de Doutor em Geologia, na especialidade de Geologia do Ambiente em 1996, pela mesma Universidade.

É actualmente Professora Associada do Departamento de Geologia da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, onde lecciona Geologia do Ambiente a cursos de Licenciatura.

É investigadora do Centro de Geologia da Universidade de Lisboa, onde centra a sua actividade de investigação nas áreas da Geologia do Litoral, Geologia do Ambiente e Ordenamento do Território.

Complementarmente, tem exercido actividade de consultadoria em Avaliação de Impacte Ambiental, Planos de Ordenamento do Território, Planos de Ordenamento da Orla Costeira e Requalificação Ambiental.

9	<b>Introdução</b>
	<b>1. O Homem como agente geológico</b>
15	<b>Expansão e explosão demográfica</b>
18	<b>Matemática do crescimento</b>
19	<i>Crescimento exponencial discreto</i>
19	<i>Crescimento exponencial contínuo</i>
21	<i>Tempo de duplicação</i>
22	<i>Crescimento logístico</i>
25	<b>Expansão demográfica e pressão antropogénica</b>
27	<b>Que futuro?</b>
30	<b>Conceito e tipos de recursos naturais</b>
	<b>2. Solos e recursos agrícolas</b>
39	<b>O solo como suporte da alimentação humana</b>
44	<b>Solo: conceito, processos de formação, constituição, perfil</b>
44	<i>Conceito de solo</i>
45	<i>Processos de formação dos solos</i>
46	<i>Constituição dos solos</i>
47	<i>Perfis de solos</i>
49	<b>Degradação dos solos</b>
51	<i>Degradação física</i>
53	<i>Degradação química – Poluição dos solos</i>
53	Poluição orgânica
54	Poluição inorgânica
56	Salinização dos solos
58	<i>Erosão dos solos: conceito e importância</i>
60	Erosão eólica
61	Erosão hídrica
61	Erosividade <i>versus</i> erodibilidade
66	Quantificação da erosão hídrica do solo
	<b>3. Recursos hídricos</b>
77	<b>Introdução</b>
80	<b>O ciclo hidrológico</b>

---

84	<b>Principais reservatórios de água superficial</b>
84	<i>Atmosfera</i>
84	<i>Oceanos</i>
85	<i>Glaciares, gelo e neve</i>
85	<i>Pântanos e sapais</i>
86	<i>Zona não saturada do solo</i>
86	<i>Lagos</i>
86	<i>Rios</i>
86	<b>Reservatórios de água subterrânea</b>
88	<i>Aquíferos</i>
90	<i>Características dos aquíferos</i>
90	Porosidade
92	Permeabilidade ou condutividade hidráulica
95	<i>Fontes de água subterrânea</i>
96	Nascentes
96	Poços
97	<b>Impactes devidos à exploração de água superficial</b>
98	<b>Impactes devidos à exploração de água subterrânea</b>
99	<i>Depleção do reservatório subterrâneo</i>
99	<i>Compacção e subsidência</i>
100	<i>Intrusão salina</i>
101	<b>Qualidade da água</b>
102	<i>Influências naturais</i>
103	<i>Fontes poluidoras pontuais e não pontuais</i>
104	<i>Poluição da água superficial</i>
105	Efluentes com carência bioquímica de oxigénio
106	Nutrientes
107	Agentes infecciosos
108	Substâncias químicas orgânicas
108	Substâncias químicas inorgânicas
108	Metais pesados
109	Ácidos
112	Bases
112	Poluição térmica
113	Sólidos em suspensão
113	Radioactividade
114	<i>Poluição da água subterrânea</i>

115	Poluentes da água subterrânea
115	Agentes patogénicos
116	Substâncias químicas orgânicas e inorgânicas
117	<i>Comportamento dos contaminantes na água subterrânea</i>
117	Decaimento e decomposição
118	Tempo de residência
118	Transporte dos contaminantes
121	Interação e sinergismo
122	<b>Aumento dos recursos hídricos</b>
122	<i>Despoluição da água subterrânea</i>
123	<i>Dessalinização</i>

#### **4. Recursos energéticos**

131	<b>O Homem e a energia</b>
133	<b>Combustíveis fósseis</b>
134	<i>Turfa e carvão</i>
136	<i>Petróleo e gás natural</i>
139	Reservatórios de petróleo e de gás natural
140	Armadilhas de petróleo e de gás natural
142	<b>Recursos de petróleo e gás não convencionais</b>
142	<i>Argilitos e arenitos betuminosos</i>
143	<i>Gás natural hidratado</i>
143	<b>Disponibilidade dos combustíveis fósseis</b>
144	<i>Petróleo</i>
145	<i>Gás natural</i>
146	<i>Carvão</i>
146	<i>Recursos não convencionais</i>
147	<i>Exploração secundária das jazidas de petróleo</i>
147	<b>Problemas ambientais resultantes da produção e utilização de combustíveis fósseis</b>
149	<i>Extracção e queima de carvão</i>
151	<i>Extracção, transporte e processamento de petróleo e gás natural</i>
152	<i>Extracção e processamento de argilitos e arenitos betuminosos</i>
153	<b>Energias alternativas</b>
153	<i>Energias renováveis</i>
153	Energia solar
155	Energia geotérmica

---

158	Hydroenergia
159	Energia das marés e das ondas
160	Energia eólica
161	Biomassa
162	Conversão de energia térmica oceânica (OTEC)
163	<i>Energia não renovável – a energia nuclear</i>
163	Fissão
165	Reservas de urânio
166	Problemas ambientais relacionados com a energia nuclear
169	Fusão

## **5. Recursos minerais**

179	<b>Introdução</b>
182	<b>Recursos minerais metálicos e não metálicos</b>
186	<b>Factor de enriquecimento</b>
189	<b>Formação dos recursos minerais</b>
190	<i>Processos hidrotermais</i>
192	<i>Processos magmáticos</i>
192	Pegmatitos
193	Intrusões bandadas
194	Kimberlitos
194	<i>Processos metamórficos</i>
195	<i>Processos sedimentares</i>
195	Concentração mecânica – os placers
198	Precipitação química
200	<i>Meteorização – Depósitos de minerais residuais</i>
201	<i>Recursos minerais dos oceanos actuais</i>
202	<b>Procura futura e oferta de minerais a nível mundial</b>
206	<b>Reciclagem</b>
209	<b>Substituição</b>
210	<b>Conservação e durabilidade</b>
211	<b>Degradação ambiental devida à exploração mineira</b>
213	<i>Produção de resíduos rochosos e escombreciras</i>
214	<i>Drenagem ácida da mina</i>
215	<b>Degradação ambiental devida ao processamento de minério</b>
217	<b>Restauração</b>
218	<b>Ciclo dos metais</b>
219	<b>Exploração de recursos minerais não metálicos</b>

## INTRODUÇÃO

Os processos geológicos afectam diariamente de forma directa ou indirecta os habitantes da Terra e alguns, especialmente os que originam prejuízos materiais avultados e/ou perda de vidas humanas, constituem com frequência notícia de jornal. Alguns destes processos, como sismos, escorregamentos, vulcanismo, inundações ou erosão costeira, são óbvios e de apreensão imediata mesmo por um observador não especializado; outros, como o levantamento das cadeias montanhosas e a sua importância na definição das zonas climáticas do Globo, a formação de jazigos minerais, a influência do vulcanismo na evolução química da atmosfera e nas perturbações do clima ou das cheias fluviais para a criação de solos férteis, são mais subtis.

Durante muitos milénios o Homem modificou lenta mas sistematicamente a paisagem natural, edificando vilas e cidades, convertendo florestas em terrenos agrícolas, drenando pântanos, construindo açudes ou pequenas barragens. Mas é essencialmente a partir do início do século XIX, devido à explosão demográfica, que vastas quantidades de recursos minerais e energéticos foram mobilizados em resposta às necessidades criadas pelas novas tecnologias industriais, as quais aumentaram o nível de vida de muitas populações mas tiveram, em contrapartida, custos ambientais elevados. É também neste intervalo temporal que criámos capacidade tecnológica para modificar significativamente a nossa envolvente geológica, reorientando sistemas fluviais, artificializando a linha de costa e alterando a geomorfologia para implantação de edifícios urbanos.

A sociedade de hoje depende completamente dos recursos terrestres, desde os minerais metálicos e não metálicos até à água, ao ar, ao solo e à energia. Não é fácil apercebermo-nos da enorme dimensão desta dependência, a qual se manifesta nos edifícios em que vivemos, nas vias e meios de transporte, nos sistemas de aquecimento, arrefecimento e iluminação, nas embalagens, em objectos como a roupa, o rádio e televisão ou nos meios informáticos. Ao necessitarmos e consumirmos os recursos terrestres, tornamo-nos parte integrante do ciclo geológico, pois extraímos materiais, criamos desperdícios e modificamos os ciclos biogeoquímicos naturais. Efectivamente, as actividades humanas e a Natureza estão completamente interligadas e a importância do Homem como factor de modificação geológica cresceu a um ritmo inusitado; a relação Homem-Planeta é uma relação dinâmica: este último por si só está em mudança permanente mas aquele contribui cada vez mais para tais mudanças numa escala sem precedentes.

O registo fóssil e sedimentar da história recente da Terra contém informação sobre as respostas dos sistemas naturais a modificações, por vezes profundas, dos factores forçadores físicos e biológicos, ocorridos no passado; este conhecimento, embora fundamental para a prospectiva de evolução futura e para a fundamentação de políticas ambientais e de estratégias de ordenamento que acompanham o desenvolvimento, tem de ser balizado incorporando a intervenção humana, factor muito recente na história geológica, em todas as esferas do planeta.

O estudo do funcionamento dos sistemas terrestres e de como eles afectam e são afectados pelas actividades humanas, ou seja, a interface entre os processos geológicos e a qualidade de vida das

---

populações, constitui o domínio da Geologia do Ambiente. Pode, pois, dizer-se que a Geologia do Ambiente é um ramo especializado da Geologia, pluridisciplinar, que centra na Humanidade as suas investigações e analisa as interacções entre o Homem e o meio físico. É, pois, uma parte das Ciências da Terra dirigida sobretudo para a análise e resolução de problemas levantados pela utilização intensiva da superfície terrestre pelos seres humanos.

O objectivo principal deste livro é fornecer ao leitor algumas ferramentas e pistas que conduzam a uma melhor compreensão do Planeta Terra como um Sistema Integrado, proporcionar maior consciencialização para os problemas ambientais e realçar o papel de cada um de nós nestas matérias. O tema Geologia e Ambiente, fascinante e envolvente, é de tal modo vasto que foi impossível abordá-lo neste texto com mais profundidade e abrangência. Temas tão pertinentes como perigosidade e riscos naturais, a atmosfera, os oceanos e a linha de costa, as alterações climáticas ou os resíduos, não foram de modo algum esquecidos e a sua importância justifica plenamente publicação futura.

O texto que agora se apresenta resulta de alguma experiência de investigação da autora, necessariamente limitada por imperativos de especialização e formação, a que se acrescenta muitas horas de pesquisa e de adaptação de numerosos textos referidos na bibliografia. Resulta igualmente da revisão cuidada e pertinente efetuada por amigos, colegas investigadores de inegável prestígio, que me deram o privilégio de poder contar com o seu tempo e sabedoria: António Galopim de Carvalho e César Andrade. Não posso deixar de referir igualmente a Madalena Sobral, que reviu um dos capítulos e finalmente a minha família, principalmente os Mários e a Mónica, que sempre me incentivaram.

---

## **1. O Homem como agente geológico**

Página intencionalmente em branco

---

## SUMÁRIO

---

- 1.1 **Expansão e explosão demográfica**
- 1.2 **Matemática do crescimento**
  - 1.2.1 *Crescimento exponencial discreto*
  - 1.2.2 *Crescimento exponencial contínuo*
  - 1.2.3 *Tempo de duplicação*
  - 1.2.4 *Crescimento logístico*
- 1.3 **Expansão demográfica e pressão antropogénica**
- 1.4 **Que futuro?**
- 1.5 **Conceito e tipos de recursos naturais**

---

## Objetivos

- Traçar a história do crescimento populacional;
- Aplicar a função exponencial e o conceito de tempo de duplicação;
- Definir e aplicar os conceitos de crescimento logístico, capacidade de suporte do meio e resistência ambiental;
- Relacionar a expansão demográfica com os problemas ambientais resultantes;
- Equacionar os diferentes cenários de evolução da população humana apontados para o futuro próximo;
- Definir recursos renováveis, inesgotáveis e não renováveis.

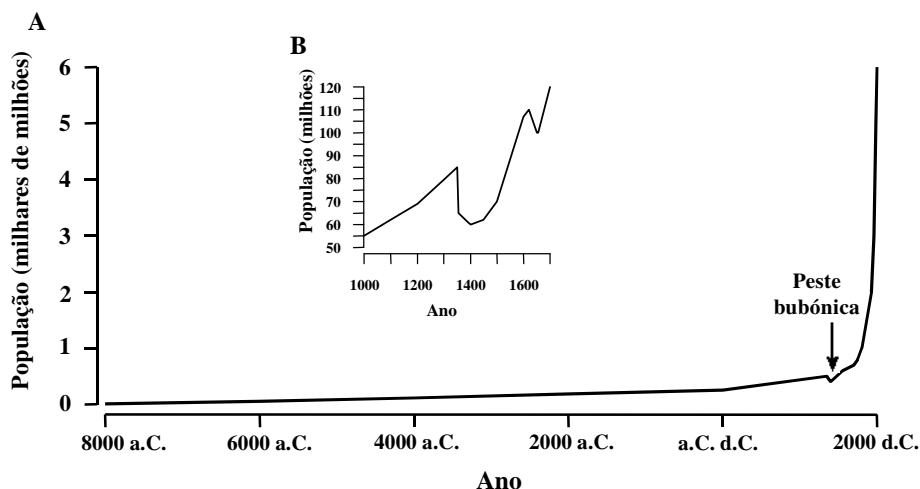
**Palavras-chave:** Explosão demográfica, capacidade de suporte, tempo de duplicação, crescimento exponencial, curva logística, pressão antropogénica, recursos geológicos, recursos renováveis, não renováveis, inesgotáveis.

## 1.1 Expansão e explosão demográfica

A população humana foi muito reduzida em número durante a maior parte da sua história. Na realidade, o seu crescimento ocorreu de forma lenta e experimentou mesmo declíneos ocasionais (Fig. 1.1A), devidos principalmente à vulnerabilidade a condições hostis, de que são exemplo as épocas de escassez de alimento ou os períodos de clima adverso. Deste modo, as taxas de crescimento da população humana foram baixas durante um intervalo de tempo muito longo porque as taxas de mortalidade eram elevadas. A transição do Paleolítico para o Mesolítico, que ocorreu há cerca de 10 000 anos atrás, marcou uma etapa importante na evolução da sociedade humana e traduziu-se pela substituição do nomadismo e actividades recolectoras, pelo sedentarismo e desenvolvimento da agricultura (revolução agrícola). Como resultado, os campos foram cultivados e os animais domesticados, o que providenciou um maior fornecimento de alimento e capacidade de armazenamento. Em consequência, as populações começaram a crescer um pouco mais rapidamente, atingindo um total de cerca de 5 milhões em 8 000 a.C.<sup>1</sup> e 50 milhões em 5 000 a.C. As evidências arqueológicas e históricas sugerem que à data do nascimento de Cristo aquele número crescera para cerca de 200-300 milhões. Durante a Idade Média, contudo, a fome, as guerras e a precariedade da saúde limitaram severamente o crescimento das populações: o surto de peste bubónica verificado no século XIV eliminou mais de metade da população da Europa e da Ásia (Fig. 1.1B). Após 1600 d.C.<sup>2</sup>, o desenvolvimento da navegação estimulou o comércio e a comunicação entre nações e este facto conduziu a melhoramentos na agricultura e melhores cuidados médicos e de higiene, os quais contribuíram para que a população humana aumentasse mais rapidamente.

<sup>1</sup> a.C. – Antes de Cristo.

<sup>2</sup> d.C. – Depois de Cristo.



**Figura 1.1** – A: Curva de crescimento da população mundial nos últimos 10 000 anos. B: Impacto da peste bubónica na população da Europa.

<sup>3</sup> Milhar de milhão é equivalente a bilião da literatura norte-americana.

Contudo, é a partir do início do século XIX que o progresso da ciência médica possibilita o controle de muitas das epidemias o que, conjuntamente com o melhoramento das condições sanitárias, levou à vitória sobre muitas doenças infecto-contagiosas tais como a cólera, a varíola ou a tuberculose e a redução generalizada da mortalidade contribuiu significativamente para um crescimento exponencial da população humana. Simultaneamente, a crescente disponibilidade de alimento devida aos avanços na tecnologia da agricultura, e à melhoria da capacidade de transporte e armazenamento de víveres, contribuiu também para uma explosão demográfica. Foram necessárias várias centenas de milhares de anos (aproximadamente 99% da história da humanidade) para que a população humana atingisse 1 milhar de milhão<sup>3</sup> (o que ocorreu próximo de 1804 – Fig. 1.1A) mas nos 123 anos seguintes este número duplicou (Tabela 1.1). Em 1950 éramos já cerca de 2,5 milhares de milhões e a última duplicação (1950-1987) aconteceu em apenas 37 anos, aumentando a população total para mais de 5 milhares de milhões.

**Tabela 1.1** – Crescimento da população mundial no século XX.

População mundial	Ano
1 milhar de milhão	1804
2 milhares de milhões	1927 (123 anos depois)
3 milhares de milhões	1960 (33 anos depois)
4 milhares de milhões	1974 (14 anos depois)
5 milhares de milhões	1987 (13 anos depois)
6 milhares de milhões	1999 (12 anos depois)

O crescimento da população humana é semelhante ao de qualquer outro organismo e está sujeito aos mesmos princípios e mecanismos reguladores. O crescimento de uma dada população depende da diferença entre as adições e subtracções a que está sujeita. As adições efectuam-se pela natalidade e imigração, enquanto as subtracções resultam da mortalidade e emigração. A taxa de crescimento de uma população calcula-se pela diferença entre a taxa de adições e a taxa de subtracções e é dada em percentagem. A taxa de crescimento da população portuguesa é de 0,2%, embora para este valor médio concorram taxas parcelares variáveis com a região do país (Tabela 1.2).

**Tabela 1.2** – Taxa de crescimento populacional em Portugal (1997), de acordo com dados do Instituto Nacional de Estatística.

	Taxa de crescimento (%)	Taxa de natalidade (‰)	Taxa de mortalidade (‰)
Portugal	0,2	11,4	10,5
Continente	0,2	11,3	10,5
Norte	0,5	12,3	8,9
Centro	0,0	10,2	12,0
Lisboa e Vale do Tejo	0,2	11,0	10,7
Alentejo	-0,8	9,0	14,6
Algarve	0,4	11,0	13,0
Açores	0,5	14,4	11,6
Madeira	0,5	12,1	9,9

É difícil, senão impossível, referirmo-nos ao crescimento da população numa perspectiva global, na medida em que as várias regiões do mundo diferem dramaticamente no que respeita a este tema. O padrão geral de crescimento populacional ilustrado na figura 1.1 não é representativo de todos os países do Mundo, pois as taxas de crescimento populacional variam consideravelmente de nação para nação. Embora existam exceções importantes, a maioria dos países pode ser classificada de acordo com as suas taxas de crescimento em dois grupos: o grupo que compreende os países mais desenvolvidos e que inclui as nações da Europa, América do Norte, ex-União Soviética, Japão, Austrália e Nova Zelândia e o grupo que compreende os países em vias de desenvolvimento<sup>4</sup> e que inclui as nações da América Central e do Sul, África e Ásia. Os países desenvolvidos têm de um modo geral baixas taxas de crescimento populacional (inferiores a 1% /ano); em contraste, os países em desenvolvimento têm taxas de crescimento anual superiores a 2% (Tabela 1.3).

<sup>4</sup> O termo “em vias de desenvolvimento” refere-se a nações relativamente pobres nas quais a agricultura ou os recursos minerais dominam a economia e a manufactura ou os serviços, desempenham um papel menor.

**Tabela 1.3** – Taxa de crescimento populacional em alguns países em desenvolvimento.

	Taxa de crescimento anual (%)	Média do n.º de filhos/família
Quénia	3,9	8
Egipto	–	5
Índia	2,3	4,3
Nigéria	2,8	6,6

---

As nações com taxas de natalidade mais elevadas são, regra geral, as mais pobres, situando-se as maiores taxas de crescimento no continente Africano. No entanto, há países ricos, como a Arábia Saudita, por exemplo, com uma média elevada de filhos (6,9) em cada família.

O crescimento rápido da população tem como consequência primordial o esgotamento da capacidade de satisfação das suas necessidades básicas, nomeadamente em termos energéticos e de alimentação, além de provocar degradação ambiental significativa e o agravamento das consequências das catástrofes naturais, muitas delas devidas a processos geológicos (sismos, actividade vulcânica) ou potenciadas por eles (enxurradas). Efectivamente, a explosão demográfica cria um cenário preocupante:

- O número de pessoas mortas, feridas ou deslocadas devido à ocorrência de desastres naturais aumentou cerca de 6% ao ano entre 1976 e 1991. As secas foram responsáveis por cerca de 1/3 das mortes e o excesso de água (furacões, cheias, tempestades) por cerca de 30%. Os processos geológicos originaram cerca de 15% dos eventos e 16% das mortes.
- Desde 1950, o número de cidades com população superior a 4 milhões de pessoas, cresceu de 15 para 47. Vinte megacidades têm hoje mais de 10 milhões de habitantes e o número de pessoas que vivem em áreas urbanas aumentou de 740 milhões para 2,6 milhares de milhões. Em países industrializados, 74% da população concentra-se nas cidades e, embora em países não industrializados aquele número seja de 37%, está em rápido crescimento. Esta expansão criou um grande problema de gestão de resíduos sólidos urbanos.
- A subida do nível do mar, mesmo que da ordem de poucas dezenas de centímetros, devido ao aquecimento global, é um facto preocupante pois a maioria das grandes cidades mundiais localiza-se na linha de costa e muitas delas estão já situadas a cotas abaixo do nível médio do mar actual.

Torna-se pois imperioso dispôr de instrumentos quantitativos para descrever os aumentos da população humana e das suas necessidades, para possibilitar o estabelecimento de previsões futuras – o que se pode designar por matemática do crescimento.

## 1.2 Matemática do crescimento

Uma das funções mais úteis e poderosas em estudos ambientais, aplicável ao crescimento das populações e das suas necessidades (consumo de recursos),

---

bem como ao estudo de outros problemas como a acumulação de poluentes e decaimento radioactivo, é a função exponencial (Masters, 1991).

### 1.2.1 *Crescimento exponencial discreto*

O crescimento exponencial ocorre quando o aumento de uma certa quantidade é proporcional à quantidade actualmente existente.

Se:

$N_0$  – quantidade inicial no instante  $t_0$ ;

$r$  – taxa de crescimento;

$N_t$  – quantidade no instante  $t$ ;

então  $N_{t+1} = N_t + rN_t = N_t (1+r)$ .

Por exemplo:  $N_1 = N_0(1+r)$ ,  $N_2 = N_1(1+r) = N_0 (1+r) (1+r) = N_0 (1+r)^2$  e, de um modo geral:

$$N_t = N_0 (1+r)^t$$

### **Actividade 1.1**

Crescimento do consumo de electricidade nos E. U. A.

Em 1999, nos E. U. A. consumia-se  $3,2 \times 10^{12}$  kwhr/ano de electricidade. A taxa de crescimento de consumo de electricidade naquele país nos 15 anos seguintes a 1973 (ano do embargo do petróleo) foi, em média anual, de cerca de 2,2%. Estime o consumo de electricidade em 2099 se a taxa de crescimento de 2,2% /ano se mantiver constante.

Resultado:  $28,2 \times 10^{12}$  kwhr/ano.

### 1.2.2 *Crescimento exponencial contínuo*

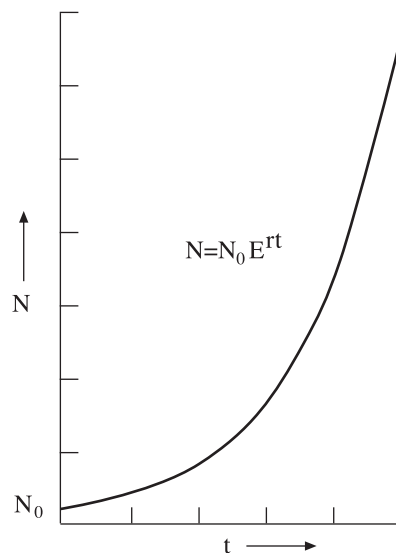
No entanto, a experiência mostra que na maioria dos casos de estudo relevantes nas ciências sociais e ambientais, é normalmente assumido que o crescimento

é mais adequadamente descrito como uma função contínua – crescimento exponencial contínuo – onde uma certa quantidade cresce proporcionalmente a ela própria ou seja, a taxa de modificação da quantidade  $N$  é proporcional a  $N$ . A constante de proporcionalidade  $r$  é a taxa de crescimento e tem unidades de tempo<sup>-1</sup>.

$$\frac{dN}{dt} = rN$$

$$N = N_0 e^{rt}$$

O crescimento exponencial ou geométrico origina uma curva em forma de J (Fig. 1.2).



**Figura 1.2** – Função exponencial.

### Actividade 1.2

Repitamos o exemplo anterior mas considerando que 2,2% é uma taxa de crescimento contínuo. Partindo de um consumo de electricidade em 1999 de  $3,2 \times 10^{12}$  kWhr/ano, qual será o consumo daqui a 100 anos, se a taxa de crescimento se mantiver constante?

Resultado:  $28,88 \times 10^{12}$  kWhr/ano.

Neste exemplo, os resultados são muito idênticos mas à medida que o intervalo de tempo em questão ou a taxa de crescimento aumentam, as duas aproximações divergem entre si. Com uma taxa de crescimento de 12% por exemplo, as respostas diferem de um factor próximo de 2.

### 1.2.3 *Tempo de duplicação*

O crescimento exponencial tem uma característica particular: a quantidade que cresce exponencialmente requer um intervalo de tempo fixo para duplicar, independentemente do valor inicialmente considerado. Ou seja, o tempo de crescimento de  $N_0$  para  $2N_0$  é igual ao de  $2N_0$  para  $4N_0$  e assim por diante. O tempo de duplicação ( $T_d$ ) de uma quantidade que cresce a uma taxa exponencial fixa  $r$  é facilmente derivada.

$$N = N_0 e^{rt}$$

$$2N_0 = N_0 e^{rT_d}$$

$$2 = e^{rT_d}$$

$$\ln 2 = \ln e^{rT_d}$$

$$\ln 2 = rT_d$$

$$T_d = \frac{\ln 2}{r} = \frac{0.693}{r} = \frac{69.3}{r(\%)}$$

$$T_d \approx \frac{70}{r(\%)}$$

Esta regra do crescimento exponencial tem utilidade imediata; por exemplo, se se pretender controlar um “bloom” de algas num lago, o qual duplica todos os dias, ter-se-á apenas um dia para o fazer quando as algas cobrirem metade do lago. Outro exemplo bastante elucidativo é o seguinte: suponhamos a multiplicação de bactérias no interior de uma garrafa a uma taxa que duplica a população cada minuto. Se o início do crescimento ocorrer às 11 horas da manhã e metade do volume da garrafa estiver ocupado às 11h59min, a próxima duplicação (isto é, a ocupação do volume restante) ocorrerá no minuto seguinte. Na sociedade humana, o tempo de duplicação é medido em anos e não em minutos, mas o resultado é o mesmo. Por exemplo, se a população dos E. U. A. continuar a crescer à taxa anual corrente de 0,7%, duplicará em aproximadamente 100 anos. Em contraste, se a população do Quênia continuar a crescer à taxa anual de 3,9%, alcançará o dobro da população actual em apenas 18 anos (Tabela 1.4).

### **Actividade 1.3**

O aumento populacional mundial de 0,5 milhares de milhões para 4 milhares de milhões demorou cerca de 300 anos. Se assumirmos um crescimento

exponencial contínuo a uma taxa constante naquele período de tempo, calcule essa taxa de crescimento, utilizando o conceito de tempo de duplicação.

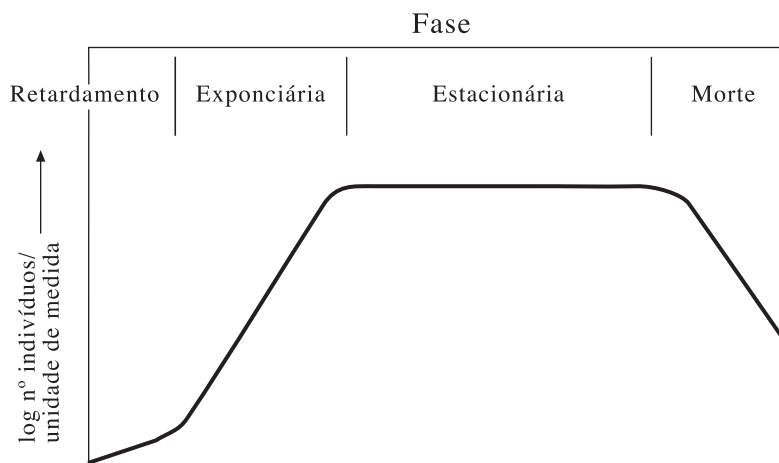
Resultado: 0,7%.

**Tabela 1.4** – Tempo de duplicação de algumas populações.

País	Taxa de crescimento anual	Nº de anos necessários para a duplicação da população
Grécia	0,5	140
Polónia	1,0	70
Taiwan	1,5	47
Etiópia	2,0	35
Perú	2,5	28
Irão	2,9	24
Guatemala	3,5	20
Quênia	3,9	18

#### 1.2.4 *Crescimento logístico*

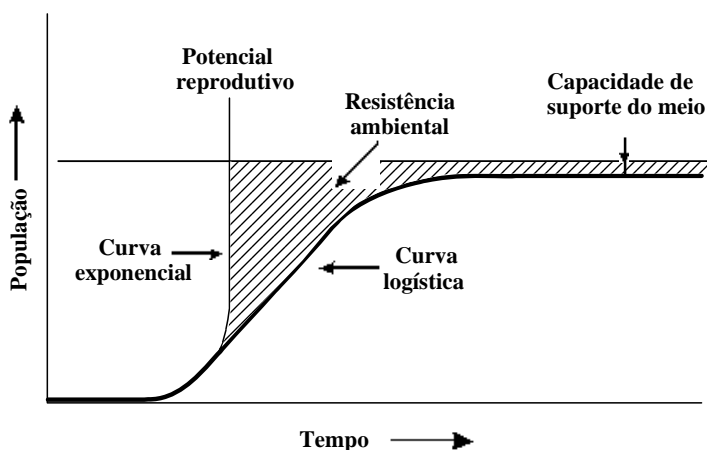
Cada população tem um potencial reprodutivo característico que é a taxa à qual essa população cresce se puder dispôr de recursos ilimitados. A abordagem experimental mostra que, em condições ideais, qualquer população cresce exponencialmente. Mas o modelo de crescimento exponencial simples serve apenas para horizontes temporais curtos pois, mesmo que as taxas de crescimento sejam pequenas, este não pode prolongar-se indefinidamente devido às limitações impostas por condicionamentos ambientais. A curva típica da multiplicação das bactérias ilustra algumas das complexidades dos sistemas biológicos (Fig. 1.3). Esta curva identifica várias fases do crescimento da população bacteriana, designadas por fase de retardamento, fase exponencial, fase estacionária e fase de morte. A fase de retardamento é caracterizada por crescimento pequeno ou nulo e corresponde ao período de crescimento inicial, logo após a inoculação de bactérias no novo ambiente. Seguidamente, as bactérias adaptam-se a este novo ambiente e ocorre um período de crescimento exponencial. Durante este tempo, as condições de desenvolvimento são ótimas e a população duplica com grande regularidade. Posteriormente, à medida que o alimento das bactérias começa a rarear ou que os produtos metabólicos tóxicos se acumulam, a população entra na fase estacionária ou de não crescimento. Finalmente, quando o ambiente se torna mais hostil, a fase de morte é atingida e a população decresce.



**Figura 1.3** – Curva típica de crescimento de uma população bacteriana (a escala vertical é logarítmica e por isso o crescimento exponencial traduz-se por um segmento de recta).

Na sequência do que foi exposto, as projecções do crescimento populacional são mais realisticamente modeladas por uma curva de crescimento logística ou em forma de S (sigmóide)<sup>5</sup>. Esta curva sugere uma fase inicial de crescimento exponencial, enquanto as condições ambientais são óptimas, seguida de um abrandamento progressivo do crescimento quando a população atinge a “capacidade de suporte” do meio. Uma espécie atinge a capacidade de suporte num ecossistema particular quando consome os recursos naturais tão rapidamente quanto esse ecossistema os produz; a capacidade de suporte pode ser definida como o número de indivíduos de uma espécie que o ecossistema pode suportar de acordo com as condições ambientais. O conjunto de factores que tende a reduzir a taxa de crescimento designa-se por resistência ambiental (Fig. 1.4). A resistência ambiental torna-se maior e a taxa de crescimento logístico menor à medida que a população se aproxima da capacidade de suporte do meio.

<sup>5</sup> Vide “A explosão Demográfica face ao Desenvolvimento Sustentável” no volume n.º 162 “Educação Ambiental”.



**Figura 1.4** – Curva de crescimento logístico.

Matematicamente, a curva logística deriva da seguinte equação diferencial:

$$\frac{dN}{dt} = rN\left(1 - \frac{N}{K}\right) \text{ em que:}$$

N – dimensão da população;

r – taxa de crescimento;

K – capacidade de suporte do meio;

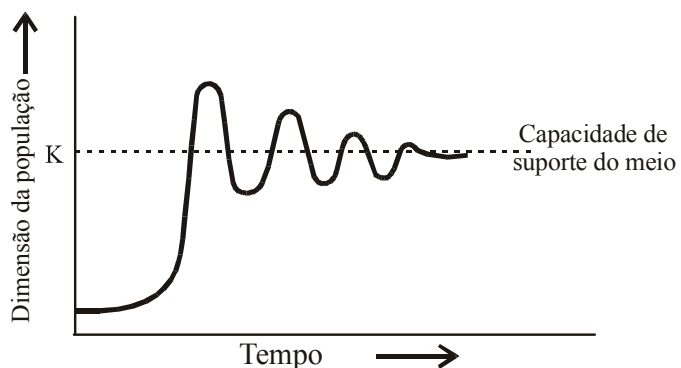
t – tempo.

Note-se que quando N é muito menor que K, a taxa de modificação da população ( $\frac{dN}{dt}$ ) é proporcional à dimensão da população (pois  $\frac{N}{K}$  é próximo de zero) e então a população cresce exponencialmente a uma taxa de crescimento r. À medida que N aumenta, a taxa de crescimento abranda e, finalmente, quando N se aproxima de K, o crescimento pára ( $\frac{N}{K} \approx 1$ ) e a população estabiliza, a um nível próximo da capacidade de suporte do ambiente. O factor  $(1 - \frac{N}{K})$  é a resistência ambiental. A solução daquela equação diferencial é:

$$N = \frac{K}{1 + ce^{-rt}} \quad r = \frac{r_0}{1 - \frac{N_0}{K}} \quad C = \frac{K - N_0}{N_0}$$

$r_0$  – taxa de crescimento inicial, quando  $t = 0$ .

Ocasionalmente, uma população pode ultrapassar a capacidade de suporte do meio, conduzindo à degradação do ambiente. Em consequência desta degradação, a população decresce rapidamente até valores abaixo da capacidade de suporte; estas oscilações em torno da capacidade de suporte repetem-se, com amplitudes decrescentes, durante algum tempo (Fig. 1.5), até que finalmente se anulam.



**Figura 1.5** – Oscilação da dimensão da população em torno da capacidade de suporte do meio e respectiva estabilização.

## Actividade 1.4

Suponha que a população humana cresce de acordo com a curva logística até estabilizar em 15 milhares de milhões. Em 1986 a população mundial era de 5 milhares de milhões e a sua taxa de crescimento de 1,7%. Quando é que a população atingirá 7,5 milhares de milhões?

Resultado: 2013.

### 1.3 Expansão demográfica e pressão antropogénica

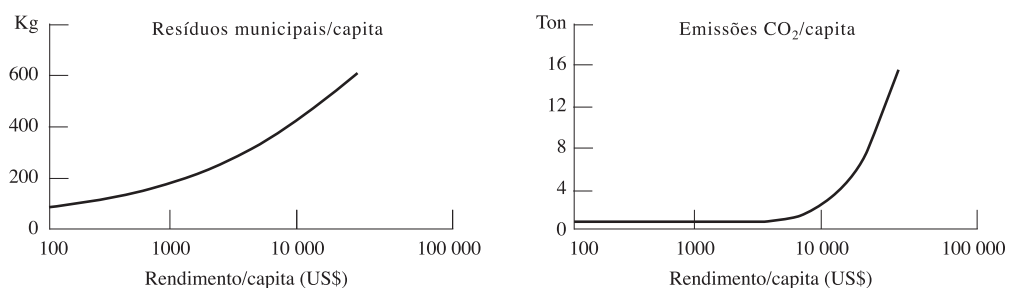
A população humana experimenta actualmente um padrão de crescimento exponencial. Será que esta explosão demográfica se prolongará no futuro, ultrapassando a capacidade de suporte do meio – se ainda não o excedeu já – ou a população humana estabilizará num futuro próximo? E como é que se equilibram esses números com os recursos existentes? O problema da disponibilidade de recursos e da avaliação da sua suficiência para suportar seis ou mais milhares de milhões de seres humanos numa base sustentável, é uma das questões mais importantes que se nos colocam actualmente.

O mundo físico tem limites finitos que mais cedo ou mais tarde restringem todas as formas de crescimento. Por isso, o conhecimento da tendência de crescimento futura, em termos populacionais ou do acesso ou consumo de recursos, é a chave para o reconhecimento da diferença entre crescimento e crescimento sustentável. Este último tem que ser compatível com a manutenção permanente das necessidades básicas de suporte à vida humana, e permitir em simultâneo a generalização de um padrão de vida saudável e minimamente confortável. Neste momento, o mundo em que vivemos está longe de ser sustentável. Uma indicação desta situação é o aumento do número de “refugiados ambientais”, estimados actualmente em cerca de 10 milhões de pessoas; esta fracção da população é forçada a migrar porque os seus sistemas de suporte entraram em colapso. Mais de 40 000 crianças com idades compreendidas entre um e cinco anos, morrem diariamente devido a má nutrição ou a doenças relacionadas com a falta ou má qualidade da água que consomem. Por outro lado, o nível de vida nos países desenvolvidos é de tal modo elevado que obriga ao uso de recursos naturais como o solo, a água, o ar, a energia e os minerais a um ritmo muito superior ao da sua reposição. Tal significa que teremos menos recursos no futuro e que o nosso padrão de vida terá necessariamente que ser reduzido, a não ser que encontremos substitutos para esses recursos (como as energias renováveis por exemplo), ou formas de os conservar. A par da poluição atmosférica, da água e do solo, a produção de enormes quantidades de resíduos sólidos<sup>6</sup> e perigosos é um problema

<sup>6</sup> Cada ano deitamos fora cerca de 160 milhões de toneladas de lixo, que incluem 50 milhões de toneladas de papel e 67 mil milhões de latas e garrafas.

resultante da pressão antropogénica que as sociedades industrializadas cada vez mais têm que enfrentar.

As assimetrias do nível de vida entre países ricos e pobres conduzem a uma partilha desigual dos recursos naturais e a uma produção desproporcionada de poluentes e resíduos (Fig. 1.6). Os norte-americanos, por exemplo, consomem cerca de 25% dos recursos globais e produzem 25 a 50% do total de resíduos industriais, embora compreendam menos de 5% da população mundial (Tabela 1.5). Os países mais desenvolvidos perfazem cerca de 20% da população mundial mas consomem mais de metade da maioria dos recursos. Assim, cada norte-americano tem um impacto muito maior no ambiente do que a média dos cidadãos de qualquer nação menos desenvolvida, como a Índia ou o Quênia. Cada pessoa nascida no mundo desenvolvido faz inevitavelmente mais danos ambientais em termos de consumo de recursos e de produção de resíduos, do que uma pessoa nascida no terceiro mundo.



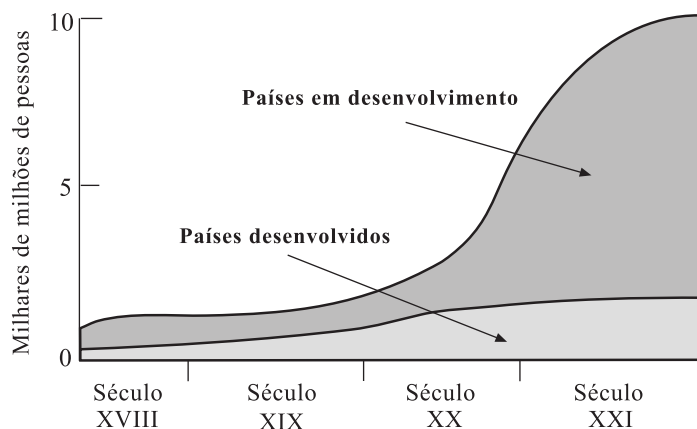
**Figura 1.6** – Produção de resíduos municipais e emissão de CO<sub>2</sub> *per capita*, em função do rendimento *per capita*.

**Tabela 1.5** – Consumo de recursos e produção de resíduos da população norte-americana.

Consumo de recursos	Produção de resíduos
26% do petróleo	50% de todos os resíduos tóxicos
24% do alumínio	26% de óxidos de azoto
20% do cobre	25% de óxidos de enxofre
19% do níquel	22% de clorofluorcarbonetos (CFC)
13% do aço	22% de dióxido de carbono

## 1.4 Que futuro?

A população humana cresce actualmente de 80-90 milhões de pessoas por ano, o equivalente à população do Canadá em cada 4 meses e à dos E. U. A. em cada 2 anos e meio. A maior parte deste crescimento ocorre nos países pobres (Fig. 1.7) onde os recursos se encontram em vias de esgotamento pelas populações actuais. Efectivamente, em 1950, a população da Europa era 2,5 vezes maior que a de África mas em 1998 esta situação inverteu-se, habitando 729 milhões na primeira e 749 milhões na segunda. Estima-se que a população africana seja três vezes superior à da Europa em 2050.

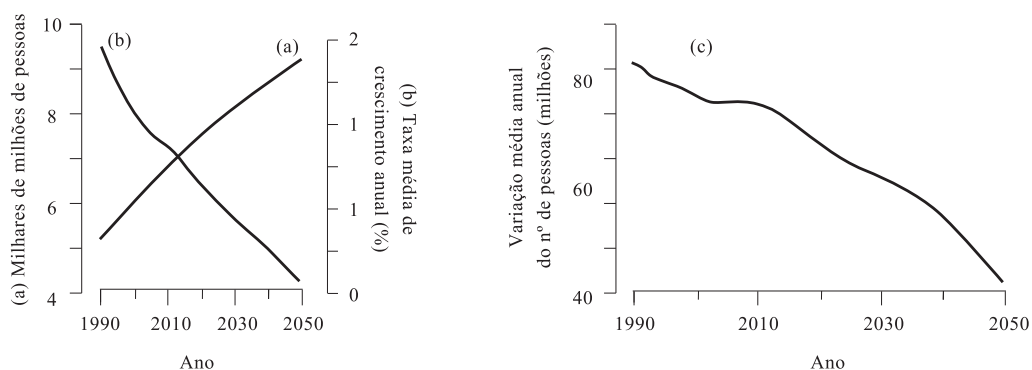


**Figura 1.7** – Contribuição dos países desenvolvidos e dos países em desenvolvimento para o aumento populacional mundial.

A taxa de crescimento anual mundial atingiu um máximo de 2% nos princípios da década de 60 mas desde essa altura diminuiu suavemente para 1,7%. De facto, a taxa de crescimento populacional actual, não tem aumentado significativamente em nenhuma região do Mundo. Muitas das nações desenvolvidas estão a aproximar-se da taxa de crescimento 0 (algumas estão mesmo abaixo) e em alguns países menos desenvolvidos, particularmente na Ásia, diminuíram significativamente. Nos últimos 20 anos o número médio mundial de crianças nascidas por mulher diminuiu de 6,1 para 3,4. Este número está ainda acima da taxa de crescimento zero de 2,1 crianças<sup>7</sup> por casal mas é um índice encorajador. Se esta taxa persistir nos próximos 20 anos, a população mundial poderá estabilizar no início do século XXI. Embora a taxa de crescimento esteja a diminuir globalmente, a diminuição é mais rápida nos países ocidentais. No ano 2000, por exemplo, a China e a Índia tinham uma população de 2 milhares de milhões, pouco menos que a população do mundo inteiro em 1950.

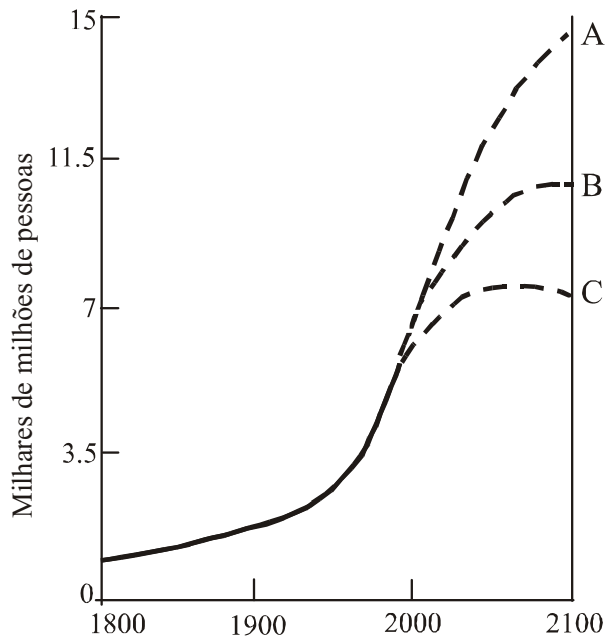
<sup>7</sup> O número 2,1 resulta de factores como a esterilidade, os nados mortos ou a opção de alguns casais em não ter filhos.

Apesar de a taxa de crescimento anual estar em declínio, o número de pessoas adicionado à população mundial em cada ano, pode aumentar por algum tempo (Fig. 1.8c). Este facto está relacionado com o conceito de “momento” da população. De acordo com este conceito, quando uma população cresce inclui pessoas que atingiram recentemente ou estão prestes a atingir a idade reprodutiva e, por isso, a população continuará a aumentar durante algum tempo mesmo que a taxa de crescimento seja nula.



**Figura 1.8** – (a) Crescimento da população mundial entre 1990 e 2050. (b) Taxa média de crescimento anual da população mundial no mesmo intervalo de tempo. (c) Variação média do número de pessoas adicionado à população mundial em cada ano no mesmo intervalo de tempo.

A figura 1.9 ilustra 3 projecções (A, B, C) efectuadas em 1990 pelas Nações Unidas, as quais assumem que as taxas de crescimento vão tender para zero nos próximos 50 anos mas com diferentes cenários de modificação. A projecção mais optimista (cenário C) assume uma taxa de crescimento de 1,5%/ano no início do século XXI – quando a população mundial for de 6 milhares de milhões. Assumindo que os governantes continuam a criar motivação para limitar o tamanho das famílias, que todas as pessoas têm acesso a programas de planeamento familiar e que os pais decidem limitar o tamanho das suas famílias ao nível da recolocação, a projecção intermédia (cenário B) é de que a população mundial atingirá 10,5 milhares de milhões antes de estabilizar em aproximadamente 100 anos (o Banco Mundial prevê um nível ligeiramente inferior de 9,8 milhares de milhões). De acordo com estas previsões, a população mundial variará entre um pouco mais de 7 milhares de milhões e quase 15 milhares de milhões no ano 2100 (cenário A). No entanto, em 1998, o gabinete de censos americano efectuou uma projecção mais optimista que aponta uma taxa de crescimento anual de 1,28% em 1999 a qual deverá cair para 0,46 em 2049, quando a população mundial totalizar um pouco mais de 9,2 milhares de milhões de pessoas (Fig. 1.8 a e b).



**Figura 1.9** – Cenários de projecção do crescimento populacional até 2100.  
A: cenário pessimista. B: cenário intermédio. C: cenário optimista.

A previsão rigorosa do crescimento populacional é muito difícil, na medida em que o comportamento reprodutivo humano é muito variável e modifica-se rapidamente no tempo. Por exemplo, as projecções baseadas nos censos de 1979 indicavam que a população dos E. U. A. seria de 410 milhões de pessoas em 2040. Em 1984, a estimativa equivalente era de apenas 290 milhões em 2020. A razão desta discrepância residiu no facto de nos anos 70-80 a generalidade das mulheres terem o primeiro filho mais tarde que na década anterior. Os dados de 1996 apontam, num cenário de crescimento intermédio, para uma população de cerca de 370 milhões de pessoas nos E.U.A. em 2040 e cerca de 394 milhões em 2050. A margem da imprevisibilidade associada ao comportamento humano justifica o esforço de actualização permanente das projecções do crescimento populacional.

O crescimento populacional é um assunto complexo, influenciado pelas estruturas sociais, religiosas, educacionais e políticas dos povos, e, particularmente, por visões distintas quanto ao estatuto das mulheres na sociedade. O sucesso dos programas de planeamento familiar exige modificações sociais profundas, entre as quais se contam o melhoramento do estatuto social, educacional e económico das mulheres (associado ao desempenho de actividades profissionais fora de casa). Um estudo conduzido em 20 nações menos desenvolvidas concluiu que as mulheres que trabalham fora de casa, têm um nível de educação primário e vivem na cidade, têm em média 4,2 filhos. Em contraste, mulheres que não trabalham fora de casa (e

---

têm igualmente um nível de educação inferior ao primário e vivem em áreas rurais) têm em média 6,9 filhos. Por outro lado, o acesso generalizado a sistemas de segurança social, o conhecimento e a disponibilidade de meios efectivos e aceitáveis de controle de natalidade, são também condições requeridas para o desenvolvimento dos meios e da confiança necessários a um planeamento familiar duradouro. Alguns especialistas dizem, em defesa desta argumentação, que a generalização da educação básica e dos cuidados de saúde básicos e a melhoria dos rendimentos, foram os factores que contribuíram para as recentes reduções da taxa de natalidade observada por exemplo em Taiwan, Coreia do Sul, Malásia e Singapura. Mas há também excepções: por exemplo, a Tailândia e a Indonésia diminuíram as suas taxas de crescimento devido a bons programas de planeamento familiar embora o seu nível de desenvolvimento sócio-económico esteja longe de igualar o de outras nações da Ásia atrás mencionadas. Um exemplo particularmente dramático da disparidade entre taxas de natalidade e índices de desenvolvimento económico é o do Kuwait. Esta nação tem um dos mais elevados rendimentos per capita do mundo e a distribuição interna da riqueza possibilitou a redução ao mínimo da pobreza. Contudo, a taxa de crescimento populacional (3,2%/ano) está entre as mais elevadas do Mundo.

Não sabemos exactamente qual é a capacidade de suporte máxima da Terra mas as estimativas disponíveis apontam para 5 a 20 milhares de milhões de pessoas, consoante os autores. Alguns psicólogos afirmam que esta incerteza e a ansiedade dela resultante nos deixam vulneráveis e geram reacções optimistas (“estamos tão mal que só podemos melhorar”) ou pessimistas (“podemos ficar muito pior”). Os especialistas em demografia não são imunes a estas tendências, de natureza subjectiva. Mas sabemos, sem dúvida, que a capacidade de suporte do Globo não é infinitamente expansível, até porque depende de uma variedade e quantidade finitas de recursos naturais disponíveis no Planeta. Assim, a Geologia tem aqui um papel fundamental no que diz respeito à compreensão dos processos geológicos e sua relação com as actividades humanas; pode contribuir, pois, para a resolução de situações mais ou menos conflituosas resultantes da interacção entre o Homem e o meio físico.

### 1.5 Conceito e tipos de recursos naturais

No contexto das Ciências da Terra, o termo recurso engloba todas as entidades naturais com valor para o Homem, quer sejam utilizadas directamente quer sejam extraídas (ou extraíveis) da Terra. Esta definição engloba os minerais, as rochas e os metais; os recursos energéticos, incluindo os combustíveis fósseis convencionais e as fontes energéticas alternativas (como a geotermia

---

ou a energia das marés); os solos e a água, quer superficial quer subterrânea. Exclui os recursos vivos, que são recursos renováveis, em contraste com a maioria dos recursos anteriores, que são não renováveis.

Os recursos consideram-se pois:

- renováveis, se puderem ser repostos ou regenerados. Por exemplo, as árvores são cortadas mas podem ser replantadas; um nível de solo erodido pode ser regenerado pelos processos físicos, químicos e biológicos da meteorização; a água subterrânea bombeada através de captações pode ser eventualmente reposta a partir da chuva. No entanto, a reposição ou regeneração de alguns destes recursos pode consumir muito tempo. Por exemplo, a regeneração de um nível de solo com 10cm de espessura pode demorar centenas, milhares e, eventualmente dezenas de milhares de anos. A água subterrânea pode ser integral ou parcialmente reposta mas, em alguns casos, ao fim de centenas de anos. Por isso, devemos modificar a definição anterior, e considerar como renovável o recurso que pode ser reposto ou regenerado à escala temporal da vida humana;
- inesgotáveis, se, tal como o nome indica, nunca se esgotam. Por exemplo, a energia derivada do vento ou das marés nunca se esgotará porque as fontes dessas energias – a energia solar ou gravítica – são inesgotáveis;
- não renováveis, se não puderem ser repostos ou regenerados à escala de tempo da vida humana.

Todos nós dependemos inteiramente dos recursos da Terra, embora nem sempre nos apercebamos da extensão dessa dependência. Os metais necessários para construir todas as máquinas sem as quais o mundo moderno não existiria, bem como os combustíveis que assegurem o seu funcionamento, são extraídos da Terra. Sem os minerais não construiríamos aviões, automóveis, televisões ou computadores. A indústria cairia e os nossos padrões de vida seriam muito inferiores. A roupa que vestimos pode ser feita com fibras sintéticas, derivadas do petróleo e muitos dos alimentos que crescem no solo, podem ser irrigados com água subterrânea e alimentados com fertilizantes feitos a partir de minerais. Porque necessitamos dos recursos terrestres, tornamo-nos parte integrante do ciclo geológico, visto que retiramos materiais, transformamo-los, criamos desperdícios e alteramos os ciclos biogeoquímicos naturais a uma escala jamais igualada no passado. Efectivamente, hoje em dia, as actividades humanas e a natureza estão completamente interligadas e cada vez mais o Homem é um dos factores principais nas modificações geológicas globais.

## Actividades 1.5

1. A dimensão da população mundial afecta directamente a gravidade da maioria dos problemas ambientais. Explique esta ideia no contexto dos conceitos de recursos e poluição.
2. Qual é a população mundial actual (arredondado a milhares de milhões)? Como se deu o crescimento populacional e porquê?
3. Explique o conceito de tempo de duplicação. Como é que o tempo de duplicação da população se modificou através da história? Qual é actualmente o tempo de duplicação aproximado da população mundial?
4. Quais são as regiões do mundo que actualmente têm maiores e menores taxas de crescimento populacional?
5. Admita que a população mundial já ultrapassou a capacidade de suporte do meio. Quais são as implicações deste facto para a expansão de melhores padrões de vida em certas regiões do mundo? Justifique a sua opinião.
6. Não há consenso sobre se já atingimos ou não a capacidade de suporte do planeta. Que critérios usaria para decidir se a população humana já superou aquela capacidade?
7. Pensa que a população actual de Portugal é muito grande relativamente à capacidade de suporte do País? Porquê?

## Bibliografia

ARMS, K.

1990 *Environmental Science*. Saunders College Publishing, 468 p.

CUNNINGHAM, W. P. e SAIGO, B. W.

1995 *Environmental Science. A Global Concern*. 3.<sup>a</sup> edição. WCB Publishers, 612 p.

DASGUPTA, P. S.

1995 *Population, Poverty and the Local Environment*. Scientific American, Fevereiro, pp. 26-31.

---

MASTERS, G. M.

1991 *Introduction to Environmental Engineering and Science*. Prentice Hall, 460 p.

McDANIEL, S. A.

1991 “People Pressure”. In: *Planet Under Stress. The Challenge of Global Change*. Mungall e McLaren Ed., Oxford University Press, pp. 225-243.

MORAN, J. M.; MORGAN, M. D. e WIERSMA, J. H.

1986 *Introduction to Environmental Science*. W. H. Freeman and Company, 2.<sup>a</sup> edição, 709 p.

MONTGOMERY, C. W.

1995 *Environmental Geology*. 4.<sup>a</sup> edição, WCB Publishers, 496 p.

SEITZ, J. L.

1995 *Questões Globais. Uma Introdução. Perspectivas ecológicas*. Instituto Piaget, 326 p.

### **Endereços electrónicos**

[http://www.npg.org/facts/world\\_pop\\_year.htm](http://www.npg.org/facts/world_pop_year.htm)

[http://www.npg.org/facts/world\\_pop\\_time.htm](http://www.npg.org/facts/world_pop_time.htm)

<http://www.zpg.org/un6billion.htm>

[http://www.npg.org/facts/us\\_pop\\_projections.htm](http://www.npg.org/facts/us_pop_projections.htm)

<http://www.ine.pt/prodserv/tema02/idemog.html>

Página intencionalmente em branco

---

## **2. Solos e recursos agrícolas**

Página intencionalmente em branco

---

## SUMÁRIO

---

- 2.1 **O solo como suporte da alimentação humana**
- 2.2 **Solo: conceito, processos de formação, constituição, perfil**
  - 2.2.1 *Conceito de solo*
  - 2.2.2 *Processos de formação dos solos*
  - 2.2.3 *Constituição dos solos*
  - 2.2.4 *Perfis de solos*
- 2.3 **Degradação dos solos**
  - 2.3.1 *Degradação física*
  - 2.3.2 *Degradação química – Poluição dos solos*
    - 2.3.2.1 Poluição orgânica
    - 2.3.2.2 Poluição inorgânica
    - 2.3.2.3 Salinização dos solos
  - 2.3.3 *Erosão dos solos: conceito e importância*
    - 2.3.3.1 Erosão eólica
    - 2.3.3.2 Erosão hídrica
      - Erosividade *versus* erodibilidade
      - Quantificação da erosão hídrica do solo

---

## Objectivos

- Esquematizar as fontes actuais de aumento de produção de alimentos e projectar o seu crescimento futuro;
- Definir o conceito de solo e equacionar os processos de formação destes;
- Conhecer os principais constituintes de um solo;
- Distinguir os vários horizontes do solo;
- Definir o conceito de solo degradado e avaliar as causas e os mecanismos dessa degradação;
- Conhecer medidas minimizadoras da degradação dos solos.

**Palavras-chave:** Revolução verde, cereais, solo, meteorização física, meteorização química, horizontes do solo, perfil do solo, degradação dos solos, lateritização, poluição dos solos, erosão dos solos, desertificação, deflacção, equação universal de perda do solo, perda de solo tolerável.

## 2.1 O solo como suporte da alimentação humana

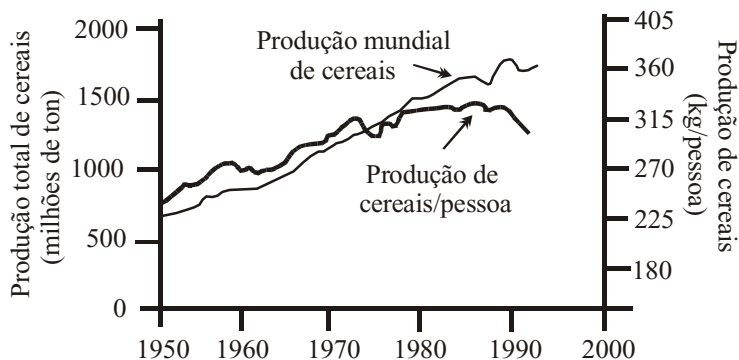
Um dos grandes problemas colocados pelo crescimento exponencial da população humana é a sua alimentação. Os nossos corpos requerem um fornecimento constante de energia, necessária para a manutenção das suas funções vitais e para a reconstrução das estruturas celulares e dos tecidos que são quotidianamente renovados. A quantidade de energia que cada um de nós necessita depende do peso do corpo, do clima, do estado de saúde, do ritmo de vida e do metabolismo básico. Assim, um adulto de estatura média, sedentário e que habite uma região com clima quente, pode necessitar de menos de 2000 calorias/dia enquanto outro com uma existência mais agitada, vivendo num clima frio pode necessitar de 6000 a 7000 calorias/dia. Em termos médios mundiais, a FAO (Food Agriculture Organization) estima em 2500 a média mínima calórica diária. As pessoas que acedam continuamente a menos de 90% deste mínimo são consideradas subalimentadas, não conseguindo energia suficiente para manter uma vida saudável, activa e produtiva e as que recebem menos de 80% daquele valor são consideradas severamente subalimentadas; principalmente as crianças que se encontram nesta última situação têm fortes probabilidades de contrair doenças físicas e mentais.

Em 1798, Thomas Maltus previu que o crescimento populacional seria mais rápido que o crescimento da produção alimentar. Efectivamente tal não aconteceu e já no século XX, entre os anos 50 e 90, a produção mundial de cereais triplicou, crescendo a uma taxa média de 29 milhões de ton/ano (Fig. 2.1). Este aumento de produção poderia, por si só, fornecer 2700 calorias/dia/pessoa, se fosse equitativamente distribuído pela população humana, o que de facto não acontece: estima-se que pelo menos 750 milhões de pessoas (cerca de 13% da população) não acedam hoje a um padrão de vida saudável e produtivo devido a insuficiência alimentar. O desacordo entre as previsões de Maltus e as observações reais deve-se a um conjunto de factores interrelacionados, que contribuíram para a expansão acelerada da produção de cereais. Entre estes, contam-se o crescimento das áreas de cultivo<sup>1</sup>, a generalização do uso de sementes resistentes e de variedades de produção elevada (HYV)<sup>2</sup> desenvolvidas por biotecnologia, bem como a utilização maciça de fertilizantes químicos, de herbicidas e especialmente de pesticidas. Esta revolução agrícola ou “revolução verde” como também é conhecida, foi melhor sucedida na Ásia (China, Coreia do Norte, Mongólia, Camboja, Vietname e Índia), onde a produção alimentar per capita aumentou quase 50% no passado recente, permitindo que países como a Índia se tornassem auto-suficientes em termos de produção alimentar (Fig. 2.2). Pelo contrário, noutras regiões como a generalidade da África, a evolução da produção alimentar não acompanhou o ritmo do crescimento populacional (Fig. 2.2) e a situação poderá agravar-se se as tendências actuais de crescimento demográfico se mantiverem. Os casos mais dramáticos correspondem a Angola, Etiópia,

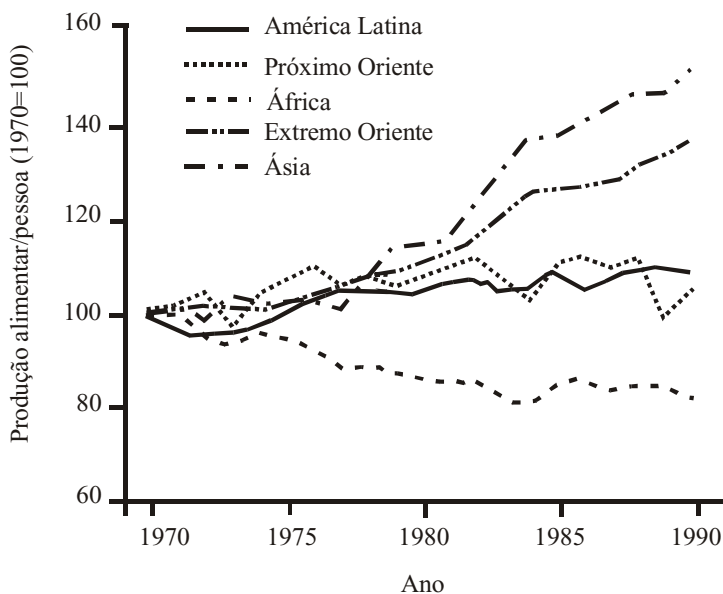
<sup>1</sup> A taxa de crescimento da superfície cultivada aumentou mais rapidamente nos últimos dois séculos que a taxa de crescimento da população humana, o que é interpretado por alguns autores como uma segunda revolução agrícola.

<sup>2</sup> HYV – High-yielding varieties.

Sudão, Somália e Moçambique, e foram essencialmente causados pela seca, pela guerra e pela miséria. A FAO prevê que 64 países (29 em África, 21 na Ásia e 14 na América Central) não estarão aptos a alimentar os seus cidadãos aos níveis correntes de produção alimentar. Mesmo sob os cenários mais optimistas, de grandes melhoramentos na tecnologia agrícola, 19 desses países (13 na Ásia, 4 em África e 2 na América Central) continuarão provavelmente abaixo das necessidades alimentares mínimas no próximo século.



**Figura 2.1** – Produção mundial de cereais e produção de cereais/pessoa entre 1950 e 2000.



**Figura 2.2** – Produção alimentar relativa *per capita* entre 1970 e 1990. A escala vertical é baseada na produção alimentar em cada região em 1970 (= 100). A China, Cambodja, Coreia do Norte, Mongólia e Vietname, são incluídos na Ásia. Os outros países asiáticos são agrupados no Extremo Oriente.

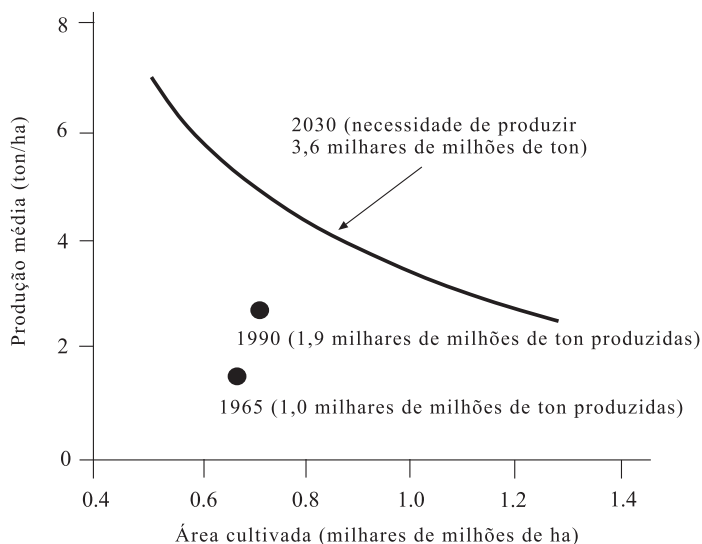
A tabela 2.1 mostra que o crescimento da produção alimentar verificado entre 1961 e 1990 teve a sua razão essencial no aumento de produção por unidade de superfície; efectivamente, apenas na América Latina e parte da África, o aumento da produção se ficou a dever à afectação de novas áreas para agricultura. Isto significa que os países desenvolvidos praticaram uma agricultura mais intensiva nas terras existentes, tendo inclusivamente (como na Europa e ex-União Soviética), perdido campos de cultivo, nos últimos 30 anos.

**Tabela 2.1** – Aumento da produção de cereais entre 1961 e 1990 (valores em %).

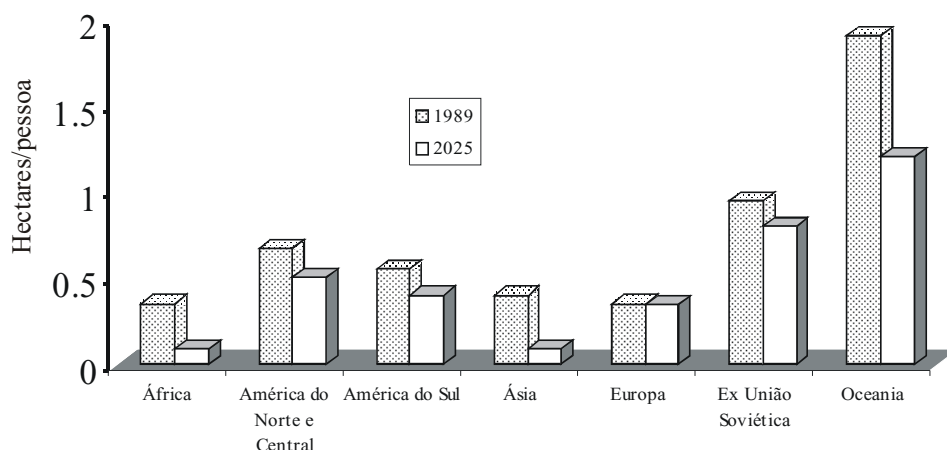
Região	Aumento Total	Aumento devido a	
		Novos campos de cultivo	Maior produção/ha
África Sub-Sahariana	73	34	39
Ásia (leste)	189	11	178
Ásia (sul)	114	16	98
América Latina	111	33	78
Médio Oriente e Norte de África	68	16	52
Europa e ex-União Soviética	76	-10	86
América do Norte	67	1	66
Mundo	100	8	92

Contudo, a partir de 1990 a produção mundial de cereais estacionou e a quantidade disponível por pessoa diminui actualmente a um ritmo significativo (Fig. 2.1). Para acompanhar o crescimento demográfico mais provável, seria necessário que a produção de cereais crescesse anualmente de pelo menos 40 milhões de toneladas, mas os especialistas calculam que apenas será possível atingir-se cerca de metade deste valor. A figura 2.3 mostra uma projecção das combinações possíveis entre produção específica e área cultivada necessárias para garantir a alimentação da população mundial em 2030. Observa-se uma relação inversa entre a produção por hectare e a superfície cultivada. Para garantir uma produção de 3,6 mil milhões de toneladas de cereais (estimada como mínimo necessário em 2030), há que optar por soluções diversas, contidas entre dois extremos: cultivar um total de 0,5 mil milhões ha com uma produção específica de 7ton/hectare ou triplicar a superfície cultivada (1,4 mil milhões ha) mantendo a produção corrente de 3ton/ha. A superfície cultivada não aumentou significativamente nestes últimos 20 anos e área disponível para crescer também não existe em abundância. Em África e na América Latina vastas áreas de inulto podem ser encontradas, na sua maior parte não produtivas devido à sua constituição (solos marginais), e à secura do clima; noutros casos, correspondem a regiões de grande biodiversidade e importância ecológica

fundamental, que impedem a sua reconversão para fins agrícolas. Se as projecções actuais de crescimento populacional estiverem correctas, a média mundial no início dos anos 90 de 0,28 ha de terra cultivada por pessoa (Tabela 2.2) diminuirá para 0,17 ha em 2025 e na Ásia e África este número será ainda inferior – 0,09 ha por pessoa (Fig. 2.4). O crescimento da produção terá, pois, necessariamente de ser conseguido através do aumento da produtividade específica. Esta depende da saúde do solo, da disponibilidade de água, da utilização criteriosa de fertilizantes, do fornecimento de energia (para o equipamento), do controle das pestes e da estabilização de sistemas ecológicos que garantam a diversidade biológica e genética.



**Figura 2.3** – Possibilidades de produção alimentar em 2030, em função da área cultivada e da produção média por hectare.



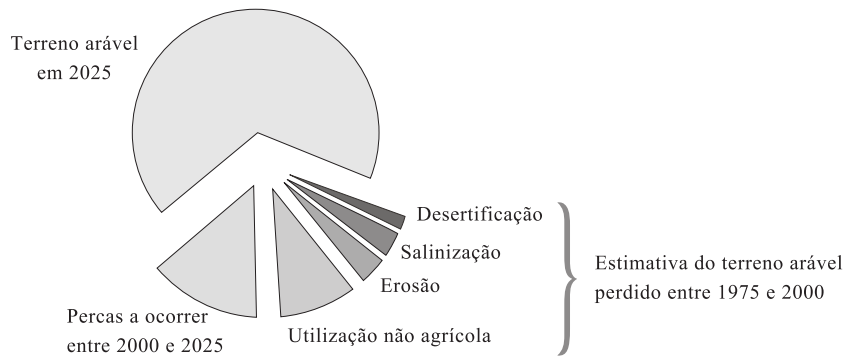
**Figura 2.4** – Área cultivada *per capita* em diferentes regiões do Mundo, em 1989 e em 2025 (projecção). À excepção da Europa, haverá menos área cultivada por pessoa no próximo século.

**Tabela 2.2** – Áreas de cultivo por região e *per capita* no início dos anos 90.

Região	População (milhões)	Área de cultivo (10 <sup>6</sup> ha)	ha/pessoa
Mundo	5300	1478	0,28
África	642	187	0,29
América do Norte e Central	453	274	0,61
América do Sul	325	142	0,44
Ásia	3113	454	0,16
Europa	498	140	0,28
Ex-União Soviética	289	231	0,80
Oceania	27	51	1,89

Mas o progresso em direcção à segurança alimentar global encontra-se hoje ameaçado pelo agravamento de um problema ambiental: a perda contínua de solo, em consequência da sua contaminação, esgotamento de nutrientes e da erosão hídrica, induzidas ou potenciadas por actividade antrópica. Efectivamente, os actuais sistemas de exploração agrícola estão a diminuir a extensão deste recurso a ritmos intoleráveis. Na Índia, por exemplo, estima-se em 4,3 mil milhões de toneladas a perda anual de solo fértil – mais do que em qualquer outro país. Nos E. U. A., onde o problema da erosão foi reconhecido e tem sido combatido desde o início do século XX, a perda de solo supera em cerca de mil milhões de ton/ano a sua capacidade de regeneração. Muitas técnicas agrícolas esgotam os nutrientes do solo e muitas outras actividades antrópicas causam a sua poluição. Por outro lado, à medida que a população mundial vai crescendo, parte das terras agrícolas vai sendo convertida para outros fins, absorvida pela expansão urbana, parques industriais e vias de comunicação (Fig. 2.5). Na Holanda, o Centro Internacional de Referência e Informação dos Solos estima que 3 milhões de hectares de terrenos agrícolas são anualmente perdidos por erosão, 4 milhões de hectares são desertificados e 8 milhões de hectares convertidos para usos não agrícolas. Conclui-se assim que estamos a destruir este recurso e a usá-lo muito mais rapidamente do que a Natureza o consegue repôr. Reconstruir um solo de qualidade é um processo lento. Nas melhores circunstâncias, estima-se que a taxa de formação do solo seja, em média, de 10ton/ha/ano – solo suficiente para originar um horizonte com 1mm de espessura distribuido num hectare<sup>3</sup>. Em condições menos favoráveis, a mesma quantidade de solo pode demorar centenas de anos a formar-se.

<sup>3</sup> Assumindo uma massa volúmica aparente de 1 ton/m<sup>3</sup>.



**Figura 2.5** – Perda de solo a nível mundial estimada entre 1975 e 2025. Considera-se 100% a área cultivável em 1975.

O esforço para aumentar a produção agrícola, depende pois não só da disponibilidade de recursos (tais como sementes, fertilizantes, pesticidas, água, energia e condições de armazenamento) como também de factores sociais, económicos e políticos (políticas eficazes de uso da terra, incentivos económicos ao aumento da produção, melhoramento das condições de armazenamento e de preservação dos alimentos e cooperação internacional) e de factores ambientais (condições climáticas favoráveis) e técnicos (controle da erosão e da poluição dos solos).

O solo é um recurso essencial, não renovável à escala de vida humana (embora renovável à escala temporal geológica), do qual dependemos como fonte da maior parte da nossa alimentação. Para manter ou aumentar a produtividade agrícola e assegurar o fornecimento mínimo de alimentos no futuro, será pois, necessário, aprender rapidamente a poupar e a utilizar convenientemente este recurso.

## 2.2 Solo: conceito, processos de formação, constituição, perfil

### 2.2.1 Conceito de solo

O conceito de solo<sup>4</sup> varia com a utilização que dele se faça. Do ponto de vista puramente pedológico, o solo é a parte sólida mais externa da crosta terrestre, que sofreu e continua a sofrer as transformações físicas e químicas causadas por agentes atmosféricos e pelos seres vivos e que serve de suporte à vegetação. Configura assim um meio complexo, dinâmico, de transição entre o ar, a água e os seres vivos da superfície e a rocha subjacente; é caracterizado por uma atmosfera interna, uma utilização particular da água, flora e fauna características e constituintes minerais ou organo-minerais. Para os geólogos e engenheiros, no entanto, o solo é algo mais amplo e não se limita à espessura do manto de alteração afectada pelas raízes das plantas ou pelos micro-organismos edáficos<sup>5</sup>.

<sup>4</sup> Vide “O solo” no volume n.º 93, Morfogénese e Sedimentogénese.

<sup>5</sup> Do ponto de vista geotécnico, solo é todo o material que se desagrega em presença de água.

O solo é nesta perspectiva, o suporte de estruturas construídas, a base de uma rede viária ou o suporte de um sistema de fossas sépticas, por exemplo. Neste sentido, o solo é um material não consolidado, meteorizado ou não, que assenta sobre material rochoso, coeso e consolidado. Este conceito inclui não só o material dos pedólogos mas também materiais estéreis tais como rochas detríticas móveis ou fracturadas, depósitos eólicos ou glaciários, materiais acumulados “in situ” ou transportados.

Para o propósito deste capítulo, interessa considerar o solo como suporte e fonte de nutrientes para a agricultura, base do potencial alimentar da população humana. Assim, é importante conhecer como se forma um solo, como é constituído, como pode ser perdido e o que se pode fazer para proteger ou mesmo reconstruir um bom solo agrícola.

### 2.2.2 *Processos de formação dos solos*

Os solos são formados por processos supergénicos, que incluem a meteorização das rochas crustais, a erosão, o transporte e a deposição de partículas minerais e rochosas<sup>6</sup>. A meteorização das rochas e minerais da superfície da terra é efectuada por processos mecânicos (desintegração, desagregação) e bioquímicos (decomposição ou alteração), desencadeados pelos agentes externos, sobretudo os que se relacionam com as condições de humidade e temperatura prevaletentes. Fazem parte da meteorização mecânica os processos de crioclastia, gelivação, termoclastia, abrasão e fracturação por descompressão; da alteração fazem parte a hidrólise, a oxidação, a hidratação e a carbonatação<sup>7</sup>. A meteorização envolve pouco ou nenhum movimento dos produtos decompostos. A erosão é um processo complexo, que envolve a remoção dos fragmentos rochosos e minerais meteorizados do seu local de formação por agentes erosivos, tais como a água corrente, o vento e os glaciares, e por acção da gravidade, o que provoca o desgaste e transformação das partículas transportadas bem como a modelação do substrato sobre o qual se deslocam. O material lítico pode ser transportado a grandes distâncias pelos mesmos agentes e finalmente é depositado.

Os solos que permanecem “in situ” sobre as rochas que lhes deram origem designam-se solos residuais e autóctones; os outros, que se formam a partir do transporte e deposição de partículas são designados solos alóctones (aluviais, coluviais).

Há uma enorme variedade de solos, com características e propriedades muito diversas, devido à multiplicidade de combinações possíveis dos factores que regulam a sua formação: clima, taxas de crescimento e de decomposição do material orgânico, características da rocha-mãe, formas de relevo e tempo de acção dos dois primeiros factores.

<sup>6</sup> Vide “A alteração das rochas e os solos” no volume n.º 93, Morfogénese e Sedimentogénese.

<sup>7</sup> Vide “Alteração mecânica e bioquímica” no volume n.º 93, Morfogénese e Sedimentogénese.

### 2.2.3 Constituição dos solos

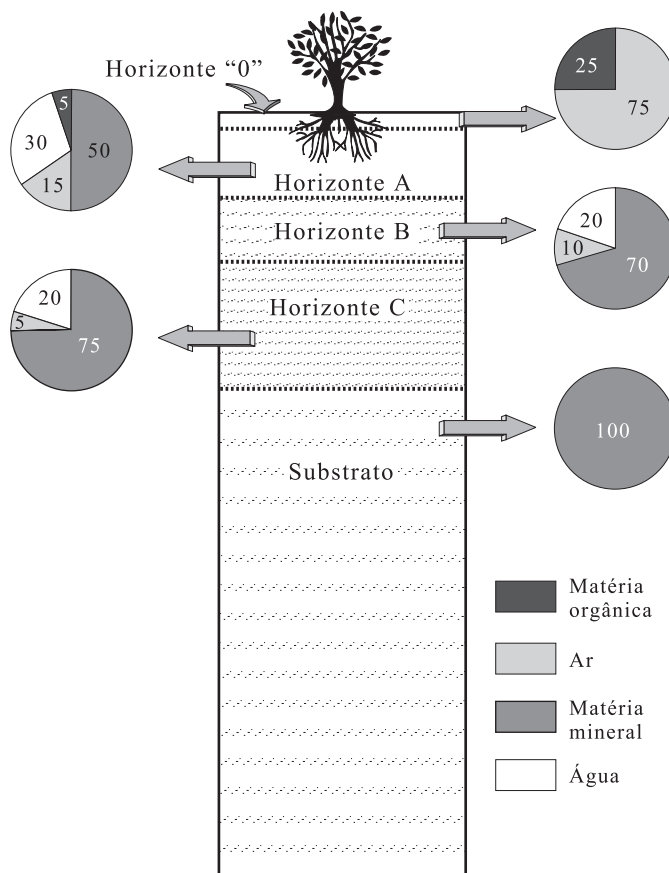
<sup>8</sup> A água existente nos solos pode estar na forma de:

- água estrutural – contida na estrutura dos minerais como os silicatos e óxidos hidratados e que apenas é libertada por hidrólise das argilas;
- água higroscópica – retida por forças electroquímicas de adesão a partículas coloidais e removida por aquecimento do solo ou seca prolongada;
- água capilar – retida nos poros de pequena dimensão por forças de capilaridade;
- água gravitacional – ocupa os macroporos e drena por acção da gravidade.

<sup>9</sup> Vide “O solo” no volume n.º 93, Morfogénese e Sedi-mentogénese.

<sup>10</sup> Estes têm a sua origem na matéria mineral mas apenas quando são transferidos para a água do solo se tornam acessíveis às plantas.

Os solos são essencialmente constituídos por matéria sólida de origem mineral, ar (atmosfera do solo), água<sup>8</sup> e matéria orgânica resultante da decomposição de restos de plantas e animais<sup>9</sup> em proporções variáveis (Fig. 2.6). Os elementos químicos que devem existir nos solos sob forma utilizável pelas plantas e que são necessários ao seu crescimento designam-se por nutrientes<sup>10</sup> (Tabela 2.3). As plantas utilizam carbono (C) extraído do CO<sub>2</sub> da atmosfera, o oxigénio e o hidrogénio da água, outros sete elementos provenientes do solo, num total de 10 nutrientes essenciais às plantas (Tabela 2.3). Com excepção do ferro, todos estes elementos são necessários em grandes quantidades e por esta razão são chamados macronutrientes. Destes, os que são necessários em maiores quantidades são o N, P e K (macronutrientes principais) e são estes os elementos chave de muitos fertilizantes NPK, com uma composição comum de 10-20-10 (10%N, 20% P e 10%K). Outros nutrientes importantes são o manganês (Mn), o zinco (Zn), o cobre (Cu), o molibdénio (Mb), o cloro (Cl) e o boro (B). Estes 6 elementos, juntamente com o ferro, são chamados micronutrientes. Certas plantas requerem outros elementos como nutrientes, tais como o sódio, o selénio, o cobalto, o alumínio, o silício, o gálio ou o vanádio.



**Figura 2.6** – Perfil de um solo mostrando a composição aproximada (em %) de cada horizonte.

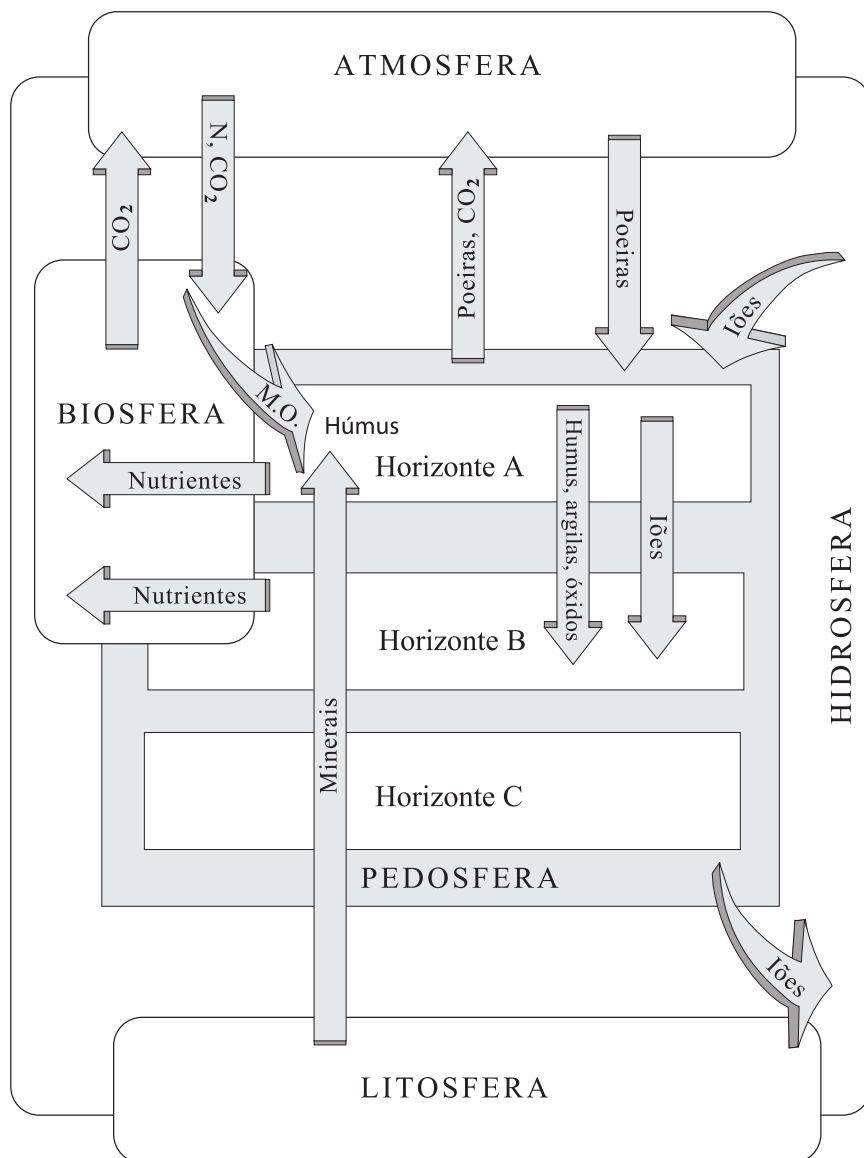
**Tabela 2.3** – Elementos essenciais às plantas superiores e respectivas fontes.

Elemento	Fonte directa	Fonte primordial dominante
<b>Macronutrientes</b> (principais e secundários)		
Carbono	Atmosfera (CO <sub>2</sub> )	Gás vulcânico
Azoto	Atmosfera (N <sub>2</sub> )	Gás vulcânico
Oxigénio	Atmosfera (O <sub>2</sub> )	Algas
Hidrogénio	Atmosfera (H <sub>2</sub> O) e poros do solo	Gás vulcânico
Potássio	Superfície de argilas	Feldspato (ortoclase)
Cálcio	Superfície de argilas, calcários, dolomias	Feldspato (plagioclase), calcite
Magnésio	Superfície de argilas, dolomias	Minerais ferromagnesianos, dolomite
Fósforo	Matéria orgânica	Apatite
Enxofre	Sulfato (águas intersticiais)	Sulfuretos
<b>Micronutrientes</b>		
Ferro	Superfície de argilas	Minerais ferromagnesianos
Manganês	Superfície de argilas	Minerais ferromagnesianos
Zinco	Superfície de argilas	Minerais ferromagnesianos
Cobre	Superfície de argilas	Minerais ferromagnesianos
Molibdénio	Superfície de argilas	Minerais ferromagnesianos
Boro	Superfície da Ilite	Rochas graníticas
Cloro	Águas intersticiais	Gás vulcânico

#### 2.2.4 *Perfis de solos*

Os solos exibem uma zonação horizontal, em “níveis” de espessura variável e com limites difusos, chamados horizontes do solo. Os horizontes diferenciam-se através de processos de adição e subtracção selectivos, de transformações químicas e transferências de matéria e energia, entre a litosfera, a biosfera, a hidrosfera e a atmosfera (Fig. 2.7). Uma secção vertical dos horizontes do solo é chamada de perfil do solo<sup>11</sup> (Fig. 2.6). Cada horizonte distingue-se em regra dos outros adjacentes, à custa de características observáveis no campo (cor, textura, estrutura, etc.), que têm correspondências químicas e mineralógicas bem conhecidas mas cuja caracterização, identificação e classificação completas exige processamento laboratorial.

<sup>11</sup> Vide “O solo” no volume n.º 93, Morfogénese e Sedimentogénese.



**Figura 2.7** – Interação entre a atmosfera, hidrosfera, biosfera, pedosfera e litosfera na formação dos solos. M. O. – matéria orgânica.

A superfície do solo encontra-se muitas vezes coberta por uma manta de material orgânico parcialmente decomposto ou ainda fresco: folhas e outros elementos orgânicos incluindo fauna (viva ou morta) ou os seus excrementos e hifas de fungos, que por vezes se chama horizonte “o” (assim designado devido à composição quase exclusivamente orgânica). Por baixo deste nível encontra-se o primeiro horizonte do solo verdadeiro chamado horizonte A, de cor negra, onde o material orgânico está intimamente misturado com partículas minerais. Este horizonte varia em espessura aproximadamente desde 1m até praticamente zero em clima desértico a árido, quente ou frio. O horizonte A

contém a maior parte dos organismos vivos e da matéria orgânica do solo (é o horizonte de máxima actividade biológica) e, pela sua localização superficial, está mais sujeito às influências directas do clima, plantas, animais e outros agentes do meio. Um kg de solo do horizonte A pode incorporar cerca de 30% de matéria orgânica, contendo: 2 biliões de bactérias, 400 milhões de fungos, 50 milhões de algas, 30 milhões de protozoários e milhares de organismos de maiores dimensões como insectos e vermes. A matéria orgânica degrada-se, produzindo CO<sub>2</sub> (que é na sua maior parte libertado para a atmosfera) e libertando nutrientes. Alguns destes nutrientes são sintetizados em macromoléculas orgânicas complexas, com elevado peso molecular, constituindo o húmus. As substâncias húmicas são essenciais para os solos e actuam como agentes “sanitários” na medida em que as suas grandes dimensões associadas a elevada capacidade adsorvente permitem-lhes armadilhar pesticidas, herbicidas e metais tóxicos (como o Pb), os quais são degradados quando a matéria orgânica se decompõe. É também chamado horizonte de eluviação – remoção mecânica de partículas – ou de lixiviação – remoção *per descensum* das substâncias (incluindo os nutrientes) solúveis, que são transportados para horizontes inferiores pela água de percolação. O horizonte B tem normalmente um conteúdo orgânico baixo e é essencialmente formado por partículas minerais finas (argilas e hidróxidos de Fe e Al sob a forma coloidal). Os componentes solúveis e as partículas argilosas lixiviadas e eluviadas dos horizontes superiores acumulam-se neste horizonte do solo – fenómeno de iluviação, o que leva a designar este horizonte por horizonte iluvial. Em algumas regiões climáticas onde o horizonte B é solicitado por evapotranspiração muito intensa, podem ocorrer fenómenos de precipitação e cimentação no seu seio para formar crustas ou nódulos impermeáveis que bloqueiam o crescimento das raízes das plantas e impedem uma drenagem eficiente da água. Por baixo do horizonte B ocorre o horizonte C que é constituído essencialmente por material parental: material lítico desagregado, “in situ”, produzido a partir da rocha-mãe, mas ainda não suficientemente modificado na sua composição química e mineralógica para se poder considerar como fazendo parte do solo. Para designar a rocha-mãe, não modificada, utiliza-se a letra R. Em geral, no sentido pedológico, o conjunto dos horizontes A e B constituem o solo verdadeiro.

### 2.3 Degradação dos solos

Considera-se que um terreno se encontra degradado quando o solo se mostra empobrecido em nutrientes, apresenta sintomas de erosão, ou está contaminado/poluído<sup>12</sup>, tendo como consequências imediatas a diminuição da pujança do coberto vegetal e da produção de biomassa ou da diversidade biológica. Este julgamento é por vezes subjectivo e é também difícil distinguir entre a degradação causada pelo homem e a que resulta de causas naturais, como a

<sup>12</sup> “Contaminação” significa a ocorrência de uma substância em concentração superior à que ocorre naturalmente, mas a substância em si ou a concentração detectada não são necessariamente nocivas. “Poluição”, por seu lado, significa a presença de um contaminante que é prejudicial aos organismos. Todos os seres vivos toleram alguma variabilidade composicional, que pode ser mesmo necessária à sua sobrevivência, embora essa tolerância varie de grupo para grupo. Por exemplo, certas concentrações de Zn ou Cu na água podem ser nocivas para alguns peixes mas não para os seres humanos. Assim, essas concentrações de Zn ou Cu podem ser um poluente para os peixes e apenas um contaminante para o Homem.

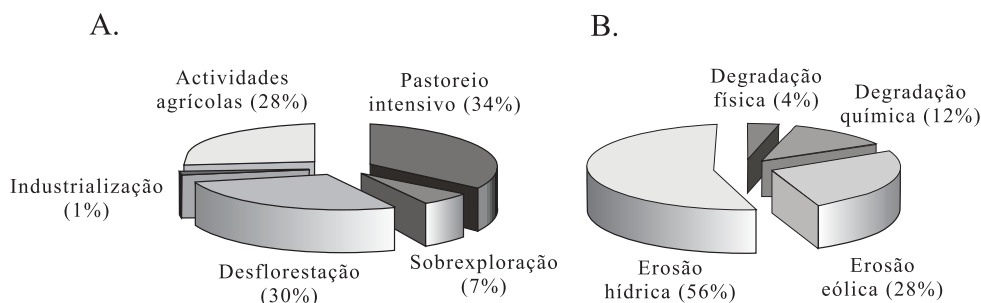
seca ou a pluviosidade em excesso. O grau de degradação do solo classifica-se em extremo, severo, moderado ou ligeiro, contabilizando-se respectivamente em cada uma destas categorias 1%, 15%, 46% e 38% dos terrenos mundiais. Num solo ligeiramente degradado apenas parte do horizonte A foi removido, ocorrem pequenas ravinas à superfície ou detecta-se uma ligeira salinização, permanecendo cerca de 70% da vegetação natural. Estes solos podem ser facilmente restaurados pela adopção de práticas de conservação adequadas. A degradação moderada implica a remoção total do horizonte A, a formação de ravinas moderadamente profundas, a presença de uma salinização moderada, compacção evidente ou concentração de compostos químicos tóxicos. O solo remanescente mostra-se empobrecido em nutrientes, não consegue absorver ou reter água, e apenas 30 a 70% da vegetação natural original consegue sobreviver. Estes solos podem apenas ser restaurados através de programas a escala nacional, subsidiados. A degradação severa tem características semelhantes à anterior, mas amplificadas: implica a formação de ravinas profundas, o esgotamento dos nutrientes e aumento da toxicidade. Menos de 30% da vegetação natural permanece, sendo a recuperação destes solos tecnicamente difícil e dispendiosa. Um terreno extremamente degradado não tem recuperação possível, e não permite desenvolvimento da vegetação. A transformação de um solo produtivo ou marginalmente produtivo em terreno de tal modo degradado que não possa servir de suporte a plantas e animais, designa-se por desertificação (embora possa ocorrer em regiões que não são desertos do ponto de vista climático<sup>13</sup>). A desertificação constitui à escala planetária um dos mais graves problemas com evidentes implicações sociais, económicas e ambientais. As Nações Unidas estimam que 40% da superfície do continente Africano (a sul da cintura saariana<sup>14</sup>), 32% da Ásia e 19% da America Latina, correm risco de desertificação. De acordo com alguns autores, Portugal é o país europeu que apresenta maior risco de desertificação, particularmente em áreas da Serra Algarvia, do Alentejo<sup>15</sup>, da Beira Baixa e de Trás-os-Montes.

<sup>13</sup> A definição dada em 1994 pelas Nações Unidas para desertificação refere a degradação da Terra em zonas áridas, semi-áridas e sub-húmidas secas, resultando de vários factores que incluem as variações climáticas e as actividades humanas.

<sup>14</sup> Todos os países africanos de língua oficial portuguesa (à excepção de S. Tomé e Príncipe) são grandemente afectados por desertificação, com especial incidência em Cabo Verde.

<sup>15</sup> No Alentejo, foi a campanha do trigo, que ocorreu entre 1929 e 1938, a principal responsável pela erosão e perda de fertilidade dos solos. Efectivamente, esta campanha contribuiu fortemente para a transformação dos solos do Alentejo em solos esqueléticos, com baixa capacidade de retenção da água e baixa produtividade.

As causas e mecanismos da degradação do solo encontram-se sumariadas na figura 2.8. Note-se que a agricultura é responsável por 28% da degradação observada e que a erosão (hídrica e eólica) é o determinante principal da maioria da perda do solo. A degradação química inclui efeitos substractivos (esgotamento de nutrientes e de matéria orgânica) e aditivos: a poluição (onde se incluem a salinização, a alcalinização e a acidificação dos solos). A degradação física inclui compacção por circulação de maquinaria pesada ou pastoreio intensivo, a acumulação de água por excesso de irrigação, a restrição de drenagem e a lateritização.



**Figura 2.8** – Degradação dos solos a nível mundial. A. Causas. B. Mecanismos. A erosão pode ser considerada como degradação física.

A tabela 2.4 mostra a distribuição mundial dos solos degradados por diversas categorias de acções antrópicas. A área total afectada é tão grande como o território ocupado pela Índia e China, envolvendo cerca de 2 mil milhões de hectares.

**Tabela 2.4** – Área degradada devido a acções antrópicas.

Região	Pastoreio intensivo	Desflorestação	Agricultura Milhões de ha	Outros <sup>(1)</sup>	Total
Ásia	197	298	204	47	746
África	243	67	121	63	494
América do Sul	68	100	64	12	244
Europa	50	84	64	22	220
América do Norte e Central	38	18	91	11	158
Oceania	83	12	8	0	103
Mundo	679	579	552	155	1965

(1) Inclui exploração de vegetação para uso doméstico (133 milhões de ha) e poluição (22 milhões de ha).

### 2.3.1 Degradação física

A estrutura física dos solos é afectada pelo modo como este é utilizado. Uma das mais antigas práticas agrícolas é a lavra, a qual tem essencialmente dois objectivos: misturar os nutrientes com as partículas do solo, aumentando simultaneamente a porosidade, e fornecer às espécies cultivadas vantagens competitivas sobre as ervas daninhas. Outras práticas têm efeito oposto – compactam o solo, pelo exercício de pressões intensivas ou continuadas, como

nos casos da circulação de maquinaria pesada ou do pastoreio intensivo. Estas práticas diminuem a porosidade do solo, dificultando a penetração das raízes, e a circulação de ar e água no seu interior. Experiências de compactação do solo efectuadas com passagem controlada de veículos, mostram que o poder de penetração da água num solo compactado decresce cerca de 78%, a humidade do solo diminui 17% e a capacidade de carga (“weight bearing”) diminui cerca de 19%. O resultado mais frequente e imediato da compactação é a retenção da água à superfície e o aumento da intensidade do escoamento superficial (Tabela 2.5) e, em consequência da taxa de erosão do solo. A lavra pode também compactar o solo, produzindo um nível superficial solto sobre o horizonte B, denso, onde as partículas foram compactadas pelo peso do arado. Esta é a forma de degradação física mais generalizada na Europa, envolvendo 90% da área total afectada por este problema. O teor em matéria orgânica de muitos solos está a diminuir drasticamente como resultado da agricultura intensiva moderna; este declínio afecta não só a estrutura e estabilidade do solo, como a capacidade de retenção da água, a actividade biológica e a retenção e troca de nutrientes. Hoje em dia utilizam-se métodos para reduzir ou reverter a compactação e a intensidade de mobilização do solo, bem como a perda de matéria orgânica. Estes incluem a adição de resíduos municipais ou outro tipo de matéria orgânica e a adopção de cultivos sem lavra (mobilização reduzida, mobilização na zona ou sementeira directa), nos quais a maquinaria se move o menos possível sobre o solo, as sementes podem ser plantadas directamente no solo não arado e as ervas daninhas são controladas por herbicidas<sup>16</sup>.

<sup>16</sup> Os herbicidas usados nas culturas são selectivos, afectando apenas as plantas dicotiledóneas (como as ervas daninhas) e não as plantas monocotiledóneas (como os cereais, por exemplo).

**Tabela 2.5** – Infiltração da água (ml/h) em terrenos de pastoreio intensivo e em terrenos não pastoreados nos E. U. A..

Local	Terrenos de pastoreio intensivo	Terrenos não pastoreados
	Infiltração da água (ml/h)	
Montana	5	31
Oklahoma	62	88
Colorado	22	62
Louisiana	18	46
Kansas	20	33
Arizona	31	41

Outro tipo de degradação física ocorre em climas tropicais húmidos, onde o excesso de precipitação lixivia praticamente todos os catiões e apenas os elementos muito insolúveis como o ferro e o alumínio permanecem como produtos residuais, dando origem a solos ditos lateríticos. Quando um solo laterítico seca ou é exposto à atmosfera oxidante, endurece, devido à

reprecipitação dos colóides residuais, sob forma de hematite e goethite, entre outras, de tal modo que as raízes das plantas têm dificuldade em penetrar – um fenómeno designado por encouraçamento superficial.

### 2.3.2 *Degradação química – Poluição dos solos*

O tipo mais comum de poluição do solo é de natureza orgânica e decorre da aplicação de agroquímicos (pesticidas – herbicidas, insecticidas e rodenticidas – e fertilizantes). Outros tipos de poluição incluem a poluição inorgânica e a salinização produzida por excesso de irrigação.

#### 2.3.2.1 Poluição orgânica

Os pesticidas químicos – compostos orgânicos sintéticos como os hidrocarbonetos clorados (DDT-diclorodifeniltricloroetano), os organofosfatos, ou os compostos orgânicos azotados – são usados para controlar as pestes. Embora esta prática exista há mais de 2500 anos, até há pouco tempo estes químicos eram “naturais” (no sentido em que não eram sintéticos) e utilizados em quantidades pequenas. Mas a partir de meados do século XX, o uso de pesticidas orgânicos sintéticos vulgarizou-se, conduzindo à sua acumulação no ambiente. Muitos são biodegradáveis mas outros não são, e estes persistem no solo ou na água por muitos anos (pois têm uma semi-vida<sup>17</sup> muito longa) e concentram-se ao longo da cadeia alimentar. Apesar de ser observado um aumento do número e variedade de espécies (nomeadamente de insectos) resistentes aos pesticidas (por modificações genéticas e selecção natural) levando a que, por vezes, a sua aplicação seja inútil, os agricultores acham-nos essenciais para a agricultura em larga escala que alimenta a civilização moderna e não prescindem da sua utilização; mas o seu uso traz numerosos problemas, dos quais o maior é a sua toxicidade para os animais (incluindo os humanos<sup>18</sup>). Efectivamente, cada ano, milhares de pessoas (na sua maioria não agricultores), dão entrada nos hospitais americanos devido a envenenamento por pesticidas. Em Portugal não existem dados oficiais sobre a utilização de pesticidas mas a informação colhida por diversos autores que se debruçaram sobre este assunto aponta para valores de consumo que colocam o nosso país nos lugares cimeiros entre os países industrializados, com um valor médio de cerca de 8kg/ha de solo arável. Quanto aos acidentes associados, a mesma informação sugere que conduzem anualmente a cerca de 350 internamentos no nosso país, um número que resulta apenas das estatísticas dos serviços de urgência hospitalar mas não inclui os casos fatais. Devido aos seus efeitos nefastos, o uso de pesticidas decresceu nos E. U. A. de cerca de 15% entre

<sup>17</sup> Semi-vida é o intervalo de tempo necessário para que uma determinada substância reduza a sua concentração para metade por processos naturais.

<sup>18</sup> A toxicidade pode ser produzida por inalação (afectando essencialmente os órgãos respiratórios), por ingestão (afectando os órgãos do aparelho digestivo e em especial estômago e intestinos) e por contacto (afectando a pele).

1982 e 1992 e métodos alternativos estão a ser testados no âmbito do programa IPM (Integrated Pest Management). Estes métodos reduzem a necessidade de uso de pesticidas até cerca de 90% em condições favoráveis e incluem o controle biológico – introdução controlada de espécies predadoras, o controle cultural – introdução de actividades físicas e um melhor ordenamento do terreno (como a queima de resíduos de plantas, a escolha de campos menos problemáticos ou rotação dos cultivos) e ainda o controle químico, com a utilização de químicos naturais (por exemplo de hormonas que impedem as larvas de alcançar o estado adulto). O controle biológico é, por enquanto, lento e incompleto (pode ter uma eficácia de apenas 70-90%). Em contraste, os pesticidas actuam em questão de horas, com uma eficiência de 95-99%.

Uma alternativa à utilização excessiva de fertilizantes sintéticos é a utilização dos produtos de moagem de rochas ricas de potássio e fósforo.

Os compostos orgânicos voláteis, como o benzeno, o xileno, o diclorometano, o tricloroetano e o tricloroetileno são também poluentes comuns no solo, principalmente em regiões industrializadas. A sua remoção do solo pode ser conseguida injectando vapor de água sob pressão, o qual limpa os gases contaminantes existentes nos poros. Este processo, que requer normalmente a abertura de pequenos poços para se bombear o vapor de água através do solo, é particularmente útil no caso de contaminação por hidrocarbonetos – querosene, gasolina e outros derivados do petróleo – retidos em locais inacessíveis, tais como solos localizados sob tecido urbano ou industrial construído ou autoestradas.

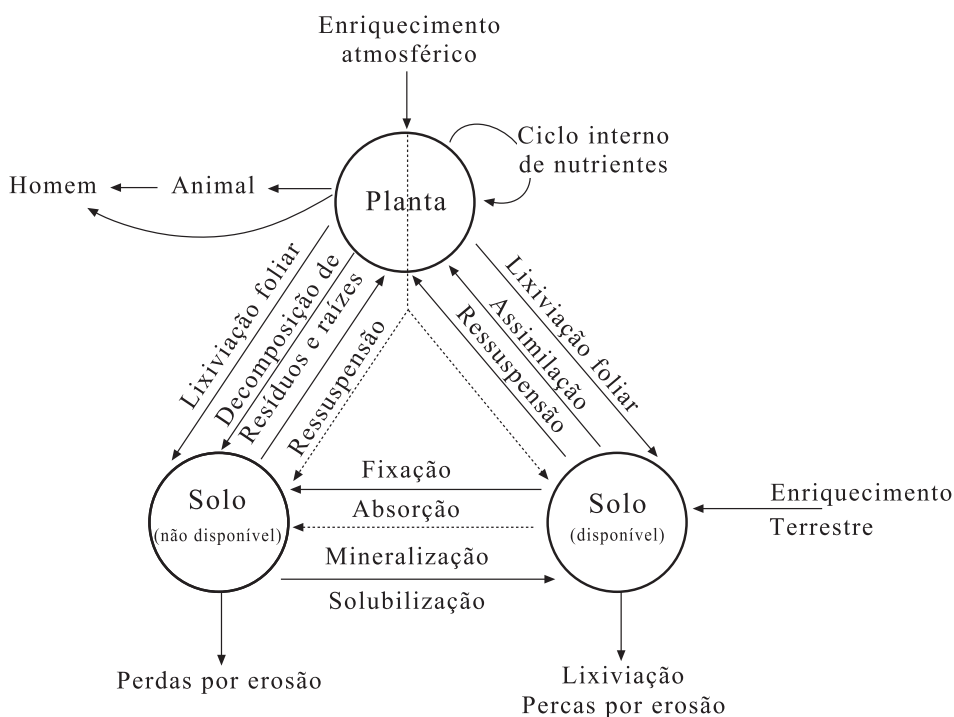
### 2.3.2.2 Poluição inorgânica

Os poluentes inorgânicos são substâncias químicas que contêm pouco ou nenhum carbono. Os poluentes inorgânicos do solo mais importantes – metais pesados<sup>19</sup> e semi-metais (As) – estão listados na tabela 2.6. A poluição do solo com metais ocorre pelo menos desde 3200 a. C. quando os povos do sul da Europa iniciaram a extracção e a fundição do cobre para fabrico de armas, utensílios e adornos. Alguns poluentes inorgânicos são micronutrientes mas, em concentrações elevadas, podem prejudicar os seres vivos. Por exemplo, os átomos dos metais pesados chumbo (Pb) e cádmio (Cd) são grandes, com número de oxidação +2. Por estas razões, são adsorvidos rapidamente pelos minerais de argila do solo. O Pb tem baixa solubilidade e grande resistência à degradação microbiana e o Cd tem um período de semi-vida elevado, características que tornam a presença destes dois elementos altamente prejudicial. Ambos têm características de toxicidade elevada: mais de mil milhões de pessoas no mundo inteiro foram já afectadas por envenenamento

<sup>19</sup> O termo “metais pesados” aplica-se aos elementos metálicos com massa atómica superior a 100 ou massa volúmica superior a 5g/cm<sup>3</sup>.

por Pb e metade desse número por cádmio. O envenenamento por arsénio e mercúrio afecta também um grande número de indivíduos.

O ciclo destes elementos nos ecossistemas agrícolas pode ser visualizado na figura 2.9; a importância relativa das várias formas de transferência de metais entre o solo e as plantas depende do elemento em questão, da espécie vegetal, do tipo de solo e das práticas de ordenamento, entre outros factores. Existem duas formas essenciais de entrada destes elementos nos ecossistemas agrícolas: deposição atmosférica (nomeadamente a partir de aerossóis) e terrestre (a partir da adição de fertilizantes, pesticidas, correctores de solo, resíduos sólidos, além da própria meteorização da rocha). As saídas são essencialmente representadas por perdas para os tecidos das plantas e remoção por lixiviação e erosão. Na medida em que existem habitual e sazonalmente modificações importantes das quantidades destes elementos entradas ou saídas destes ecossistemas, eles estão quase sempre em estado de não equilíbrio, no que respeita aos poluentes inorgânicos e normalmente encontram-se enriquecidos ou deficientes em um ou mais micronutrientes. Felizmente, a poluição inorgânica dos solos agrícolas não é um fenómeno muito generalizado. Mas é um problema de grande acuidade em áreas não agrícolas, particularmente das envolventes de antigas minas ou áreas industriais.



**Figura 2.9** –Ciclo biogeoquímico geral de elementos traço nos ecossistemas agrícolas.

**Tabela 2.6** – Fontes de alguns dos poluentes inorgânicos do solo.

Elemento	Principais utilizações	Fontes de contaminação
Arsénio (As)	Pesticidas, aditivo de rações para animais, detergentes.	Carvão, petróleo, escórias de minas, indústria metalúrgica, deposição atmosférica.
Cádmio (Cd)	Pigmentos de tinta, plásticos, baterias, galvanoplastia de ferragens.	Deposição atmosférica, indústria metalúrgica, indústria química.
Crómio (Cr)	Aço inoxidável, pigmentos de tinta, fabrico de tijolo, cromagem de metais.	Indústria metalúrgica, efluentes domésticos, lamas de efluentes.
Cobre (Cu)	Cabos eléctricos, canalizações, bronze, galvanoplastia a latão.	Indústria metalúrgica, lamas de efluentes, deposição atmosférica.
Chumbo (Pb)	Pesticidas, baterias, produtos metálicos diversos, pigmentos, químicos diversos, aditivo de combustíveis derivados do petróleo, carvão e gasolina.	Indústria metalúrgica, lamas de efluentes, deposição atmosférica.
Mercúrio (Hg)	Plásticos e equipamento eléctrico, produção de químicos, pesticidas.	Centrais termoeléctricas a carvão e deposição atmosférica.
Níquel (Ni)	Produtos químicos, baterias, combustão de petróleo, gás e carvão, ligas metálicas.	Indústria metalúrgica, lamas de efluentes, deposição atmosférica, efluentes domésticos.
Zinco (Zn)	Baterias, fabrico de borracha, revestimento de metais, diversas ligas metálicas incluindo o latão.	Indústria metalúrgica, deposição atmosférica, efluentes domésticos.

A concentração de metais pesados na pedosfera é muito preocupante do ponto de vista ambiental na medida em que estes elementos não estão sujeitos a qualquer processo de degradação natural. Um modo de descontaminação dos solos é a sua lavagem com água. Este processo, que envolve a separação física das argilas (contaminadas) dos fragmentos mais grosseiros (que não reagem com os metais tóxicos), requer a utilização de uma grande quantidade de água que tem de ser posteriormente evacuada e tratada e gera também grandes volumes de lamas que têm igualmente de ser evacuadas e armazenadas. A evacuação e armazenamento das lamas contaminadas é difícil e sujeita a severas restrições ambientais. Algumas plantas podem ser utilizadas como elementos de descontaminação visto que conseguem extrair certos metais pesados do solo e concentrá-los nas suas folhas e caules. Infelizmente, este método, ainda pouco investigado, pode requerer mais de 10 anos para reduzir o grau de poluição para níveis de segurança.

### 2.3.2.3 Salinização dos solos

Os sais penetram no solo em solução na água que nele se infiltra. Têm origem na dissolução e hidrólise de partículas minerais mas estão já presentes em toda

a água que cai no solo proveniente da precipitação ou da irrigação. Os sais abandonam o solo quando são absorvidos pelas plantas ou quando são carregados para os rios na água de drenagem. Na maior parte dos sistemas naturais, estes dois processos estão em equilíbrio dinâmico de forma que o conteúdo total em sais do solo é invariável ao longo do tempo. Mas, em alguns locais, os processos naturais ou a influência antrópica interferem neste balanço e o solo pode tornar-se altamente salgado. Por salinização entende-se a acumulação excessiva de sais – como o cloreto de sódio (halite) ou os carbonatos de cálcio ou de magnésio (calcite e magnesite) – no solo. A salinização é um problema grave, principalmente em regiões áridas<sup>20</sup> onde a sobre-irrigação é necessária para tornar o solo produtivo. Efectivamente, se a irrigação é fundamental em muitos campos de cultivo para aumentar a produtividade e mesmo indispensável em pelo menos 13% dos terrenos aráveis, pode também ser responsável noutros casos pela destruição da fertilidade natural através da salinização. Tal acontece porque a água de irrigação contém sais dissolvidos que precipitam no solo quando aquela se evapora. O cálcio e o magnésio tendem a precipitar sob a forma de carbonatos ou sulfatos e o sódio iónico é adsorvido pelas partículas argilosas ou precipita sob a forma de cloreto. Os primeiros geram nódulos e incrustações que dificultam ou impossibilitam a infiltração da água e a penetração das raízes. O segundo, em concentração elevada, diminui a produtividade. Nestas condições, os solos tornam-se improdutivos e são mais facilmente erodidos. A salinização dos solos é hoje um problema sério em cerca de 25% dos terrenos agrícolas do mundo mas esta percentagem aumenta todos os anos, pois os agricultores das nações em desenvolvimento tendem a ocupar os solos marginais, que necessitam de irrigação.

Embora a irrigação seja a causa mais importante da salinização rápida dos solos, outras podem igualmente ser apontadas, como a adição de fertilizantes inorgânicos ou as práticas antrópicas que modifiquem a posição do nível freático.

A irrigação do solo não implica necessariamente a sua salinização. Uma prática de irrigação cuidada, acompanhada de drenagem adequada, pode prevenir, e mesmo reverter o processo de salinização. Quando a água é adicionada mais rapidamente do que é evaporada ou transpirada, parte dela percola através do solo em direcção às linhas de água mais próximas, lixiviando sais. Esta solução correctora é, porém, dispendiosa: requer mais água de irrigação e canais de drenagem. Pode também poluir as águas superficiais locais (Tabela 2.7) tornando-as impróprias para consumo. A intensidade da salinização pode ser abrandada ou mesmo anulada com uma utilização racional da irrigação, tendo em conta que as sementes são muito mais susceptíveis do que as plantas. Assim, se o substrato fôr fortemente irrigado antes da sementeira e, depois desta se empregar apenas a quantidade justa de água de que as plantas necessitam, diminui-se a adição excessiva de sais. A reversão da salinização pode ainda ser obtida a partir da reflorestação com espécies arbóreas tolerantes ao sal.

<sup>20</sup> Uma região é definida como árida se a evapotranspiração excede a infiltração. Em termos práticos, corresponde às regiões em que a precipitação média anual ronda os 200 a 250mm.

O consumo de água por estas árvores rebaixa o nível freático e a sombra por elas provocada reduz a evaporação, o que abranda a taxa de ascensão por capilaridade da água subterrânea; a penetração e crescimento das raízes no solo tornam-no mais permeável, aumentando a capacidade de lixiviação dos sais e as folhas mortas adicionam matéria orgânica e nutrientes ao horizonte “o”, melhorando a sua qualidade.

**Tabela 2.7** – Aumento da salinidade (%) da água de rios dos E. U. A. em consequência de irrigação. A salinidade é expressa em mg/l de CaCO<sub>3</sub>.

Local	Salinidade		
	A montante da irrigação	A jusante da irrigação	Aumento
Rio Grande, Texas	111	631	570
Sunnyside, Washington	40	299	750
Arkansas River	212	890	420
Sutter Basin, Califórnia	72	480	670

### 2.3.3 *Erosão dos solos: conceito e importância*

Os solos que a meteorização tem vindo a originar à superfície da Terra não podem acumular-se continuamente ao longo dos tempos geológicos. Se tal sucedesse, toda a Terra estaria coberta por uma camada de solo espessa de centenas ou mesmo milhares de metros. De facto, a água corrente e o vento erodem em permanência a superfície do solo e algum material meteorizado é também deslocado ao longo das vertentes por simples acção da gravidade. Todas as formas de erosão contribuem para remover o solo quase tão rapidamente quanto ele se forma e, por esta razão, o solo tem apenas alguns metros de espessura na maior parte das regiões do mundo. Contudo, a utilização de técnicas agrícolas impróprias, o pastoreio intensivo, desflorestação e a expansão de edificações podem acelerar a erosão. De facto, o solo está hoje a erodir mais rapidamente do que é formado em cerca de 35% dos terrenos de cultivo mundiais, resultando daqui uma perda anual calculada em 25 mil milhões de toneladas (o que equivale a perder anualmente cerca de 1% dos terrenos agrícolas). A manutenção destas taxas de erosão reduziu a produção agrícola em cerca de 25% na América Central e em África e 20% na América do Sul no final do século XX. Cerca de 50 mil milhões de toneladas são também perdidas anualmente nas regiões florestadas ou ocupadas por edificações urbanas. A par dos efeitos directos na fertilidade e na produtividade, a erosão dos solos pode ter impactes indirectos muito significativos, gerando prejuízos materiais adicionais e mesmo perda de vidas humanas. De facto, a maioria

dos produtos desta erosão é transportada pelos rios e eventualmente depositada na secção jusante dos vales fluviais, em deltas ou em albufeiras. A erosão acelerada pode rapidamente diminuir ou inibir a nevegabilidade dos rios, aumentar a frequência e a intensidade das cheias<sup>21</sup>, diminuir a capacidade de armazenamento das albufeiras (Tabela 2.8) com a consequente diminuição do seu tempo de vida útil e utilidade (abastecimento de água, produção de energia ou controle das inundações), assorear portos, lagoas, lagunas ou estuários. A tabela 2.9 reúne estimativas da carga sedimentar transportada por alguns dos maiores rios do mundo. Embora parte desses sedimentos resultem de erosão natural, a sua carga sólida actual aumentou significativamente em consequência da erosão acelerada causada por desflorestação e práticas agrícolas desadequadas.

<sup>21</sup> O aumento da frequência das cheias deve-se a dois factores essenciais: por um lado o aumento da carga sólida transportada pelos rios aumenta o volume do curso de água e, por outro, o excesso de vasa é preferencialmente depositado nas margens do canal fluvial (motas marginais), estrangulando a secção de escoamento original.

**Tabela 2.8** – Taxas de assoreamento em albufeiras.

País	Albufeira	Taxa anual de assoreamento (ton)	Tempo de preenchimento total (anos)
Egipto	Aswân High Dam	139 000 000	100
Paquistão	Mangla	3 700 000	75
Filipinas	Amblukao	5 800	32
Tanzânia	Matumbulu	19 800	30
Tanzânia	Kisongo	3 400	15
Portugal	Idanha	147 000	–
Portugal	Caia	222 000	–
Portugal	Arade	114 000	–

**Tabela 2.9** – Descarga sólida anual de alguns dos maiores rios (adaptada de Thompson e Turk, 1993).

Rio	País	Carga sedimentar anual (milhões de toneladas)
Amarelo	China	1600
Ganges	Índia	1455
Amazonas	Brasil	363
Mississipi	Estados Unidos América	300
Irrawaddy	Burma	299
Kosi	Índia	172
Mekong	Ásia	170
Nilo	Egipto	111

<sup>22</sup> Entende-se por erosão actual a erosão que existe em determinado lugar no momento presente sem prejuízo de que possa ou não continuar a manifestar-se ao mesmo ritmo e da mesma forma no futuro. Entende-se por erosão potencial a susceptibilidade à erosão e a erosão que se prevê possa ou vá ter lugar no futuro numa determinada zona.

É pois de extrema importância estudar a erosão actual ou potencial<sup>22</sup>, natural ou acelerada, pois este estudo permite:

- detectar os locais onde o processo erosivo se encontra mais avançado, para corrigir e salvar o solo remanescente;
- detectar e cartografar as zonas mais sensíveis à erosão, aspecto importante quando se projecta uma modificação do uso do solo, para adequar as intervenções planeadas e minimizar impactes negativos associados;
- detectar os lugares onde o fenómeno erosivo é, ou pode vir a ser, mais intenso, com a finalidade de evitar prejuízos sobre as intervenções humanas (barragens, culturas, taludes, fundações, etc.).

### 2.3.3.1 Erosão eólica

A erosão eólica traduz-se por dois processos distintos:

<sup>23</sup> Também chamada corrasão.

- abrasão<sup>23</sup> – efeito de desgaste associado à passagem de uma corrente de ar carregada de partículas sólidas (areias, siltes) que impelidas contra as rochas contribuem para a sua desintegração;
- deflacção – efeito de levantamento e arraste das partículas móveis existentes à superfície do solo.

Os sedimentos transportados pelo vento têm geralmente um espectro granulométrico mais estreito que os transportados pela água, na medida em que a densidade e a viscosidade do ar são muito inferiores às da água. Por esta razão, o transporte eólico não é capaz de mobilizar partículas cuja dimensão exceda alguns milímetros. Em tempestades excepcionais, quando a velocidade média do vento atinge ou ultrapassa mesmo os 300km/h (em algumas rajadas), uma ou outra partícula rochosa mais grosseira pode ser levantada a alturas de 1m ou mais e transportada a curtas distâncias. Contudo, a velocidade média do vento raramente ultrapassa os 50km/h e as partículas maiores que as correntes de ar podem mobilizar são grãos da dimensão das areias (2mm-0,0625mm). Estes grãos movimentam-se numa camada estreita junto à superfície por saltação e apenas as partículas mais finas (poeiras) viajam em suspensão e podem percorrer nesse estado distâncias muito longas.

A erosão eólica pode igualar ou exceder a capacidade erosiva da água, em climas áridos e semi-áridos, onde a superfície do solo se encontra quase permanentemente seca, a vegetação está ausente ou é esparsa e em áreas relativamente planas. As poeiras são frequentemente transportadas pelo vento

de um continente para outro. Efectivamente, as tempestades de pó que ocorrem nos meses de Verão no deserto do Sahara (Norte de África) levantam nuvens de poeira que acabam por sedimentar nas ilhas do mar das Caraíbas, a 5000km de distância. Estima-se que os ventos que sopram na bacia do Mississipi e que são responsáveis pelos produtivos solos de “loess”<sup>24</sup> do vale superior deste rio, têm uma capacidade de carga que excede cerca de mil vezes a do próprio rio. Estima-se que cada km<sup>3</sup> de ar pode suspender cerca de 900 toneladas de partículas finas.

<sup>24</sup> Partículas de silte, areia fina e argila depositadas pelo vento.

### 2.3.2.2 Erosão hídrica

A erosão hídrica é o processo de erosão dos solos associado à precipitação e ao escoamento da água superficial, que desagrega e transporta as partículas, actuando de duas formas:

- ataque superficial – traduz-se pela desagregação, dispersão e arraste mecânico das partículas do solo;
- ataque em profundidade – a actuação da água cria condições propícias ao perfil do solo para que este se desloque por acção da gravidade.

A erosão hídrica é o tipo de erosão mais importante e com efeitos mais prejudiciais no nosso país e por isso lhe dedicaremos mais atenção. O estudo da erosão hídrica é habitualmente sistematizado na quantificação e análise dos parâmetros ou elementos exteriores ao solo que a originam – o clima – e na dos elementos intrínsecos que a regulam – o solo, o coberto vegetal, o relevo e factores de natureza antrópica (práticas de uso do solo). Os primeiros designam-se colectivamente por erosividade e os segundos por erodibilidade.

### Erosividade *versus* erodibilidade

A eficiência do processo de erosão hídrica pode resumir-se na expressão:

- Erosão = f (Erosividade, Erodibilidade), em que:
  - Erosividade – a capacidade potencial da chuva e do escoamento superficial ou escorrência para provocar erosão, que por sua vez depende das características da chuvada ou aguaceiro;
  - Erodibilidade – a vulnerabilidade ou a susceptibilidade intrínsecas do solo à erosão, que dependem das suas características, da forma como este é utilizado e da fisiografia local.

---

## Erosividade

A erosividade relaciona-se directamente com a precipitação, em termos de intensidade e concentração. A erosividade associada à precipitação, desdobra-se em dois processos erosivos distintos: a desagregação, arranque e mobilização das partículas do solo devido ao impacte directo das gotas de chuva, e a que resulta do escoamento superficial da água sobre o solo.

A investigação experimental demonstrou claramente que, na maioria absoluta dos casos, a erosão associada ao impacte directo das gotas de chuva sobre um solo é responsável por 70-90% da perda de solo observada, cabendo ao escoamento superficial a fracção menos importante. De facto, a energia (cinética e potencial) originalmente associada às gotas de água em queda livre, é instantaneamente transferida às partículas do solo no momento do impacte. Essa energia é utilizada para desagregar torrões mais ou menos coerentes, levantar partículas da superfície ou mesmo mobilizá-las a favor da inclinação local dos taludes. Por seu turno, o escoamento superficial tem (salvo excepções bem definidas) capacidade de arranque e mobilização de partículas relativamente diminuta, devido à pequena velocidade média que habitualmente caracteriza o escoamento da lâmina de água superficial. Apenas quando volumes de água são confinados e canalizados aqueles efeitos se potenciam. Qualquer lâmina de água em escoamento tem, no entanto, elevada capacidade de transporte potencial, se o arranque e mobilização inicial das partículas fôr assegurado por processo independente. Tal resulta da pequena diferença de densidades que separa a água da generalidade das partículas minerais, que quase se anula quando essas partículas são agregados poligranulares, porosos, o que acontece na maioria dos solos.

O principal factor que determina a capacidade erosiva da chuva é a intensidade (da qual depende a massa e o número das gotas presente num dado momento por unidade de volume na atmosfera) e a duração (factor complementar do primeiro na determinação da quantidade total da precipitação) do aguaceiro. O impacte das gotas de chuva é, pois, um processo com elevada capacidade erosiva mas baixa capacidade de transporte. O escoamento superficial ou acanalado tem habitualmente baixa capacidade de destacamento e mobilização das partículas mas elevada capacidade de transporte. Quando ambos actuam conjuntamente num solo desprotegido, a erosão rapidamente atinge proporções severas.

## Erodibilidade

### – O solo

As propriedades do solo mais importantes em termos da sua erodibilidade são: a permeabilidade (que traduz a taxa de infiltração) e a sua resistência à

---

desagregação, dispersão e transporte. Um solo com boa permeabilidade dificilmente atinge um estado de saturação total que origine o escoamento superficial e o transporte de partículas. Em contrapartida um solo com baixa permeabilidade satura facilmente, possibilitando a acumulação de uma lâmina de água que necessariamente escoar a favor da gravidade desencadeando erosão. A resistência à desagregação depende da estrutura e da textura do solo, da natureza dos minerais de argila presentes, do teor e tipo de matéria orgânica e da natureza das bases de troca presentes. Um parâmetro físico também importante é o seu teor de humidade no momento em que ocorre a chuvada. Este factor está em geral associado à frequência das precipitações na medida em que chuvadas frequentes mantêm um teor de humidade mais elevado no solo que, por sua vez, diminui a resistência à erosão. Esta consequência deve-se à diminuição da capacidade de infiltração do solo, e à diminuição da estabilidade dos seus agregados.

– O relevo

O factor topográfico engloba o declive e o comprimento dos taludes, bem como a morfologia dos elementos do relevo, a exposição das encostas à insolação e aos ventos predominantes, a sua localização geográfica e altitude. Destes componentes os dois primeiros são, sem dúvida, aqueles que assumem um papel mais importante no controle da erodibilidade. De facto, o volume de água disponível para escoar é função, sobretudo, do comprimento da encosta e a velocidade do escoamento superficial depende, sobretudo, do declive. Por sua vez, o caudal líquido e a velocidade do escoamento superficial controlam a quantidade e a dimensão das partículas que a água pode arrastar ou transportar em suspensão, isto é a intensidade da erosão. Vários autores observaram um aumento da perda de solo com o aumento dos declives afectados. Na Nigéria, por exemplo, as taxas de erosão anual do solo variam entre 3 ton/ha em declives inferiores a 1% e 222 ton/ha em declives de 15%. No que respeita à influência do comprimento dos taludes ( $L$ ) na perda de solo ( $A$ ), há diversas experiências que sugerem uma relação do tipo  $A = L^p$ . Os valores do expoente ( $p$ ) variam entre próximo de 0 e 1,6, em função do local, das características do solo, da intensidade da precipitação, do declive e da densidade e tipo de coberto vegetal. Quanto aos restantes componentes do factor topográfico, merecem referência:

- a forma das encostas – rectilínea, côncava, convexa, composta (côncavo-convexa ou vice-versa) ou irregular – influencia a erosão do solo através do efeito combinado do declive e do comprimento da encosta. Na base das encostas côncavas, devido à redução do declive, os materiais erodidos do topo tendem a ficar acumulados. Na base das encostas convexas, que dominam em geral as linhas de água, o material erodido tem tendência a ser arrastado na sua totalidade para elas;

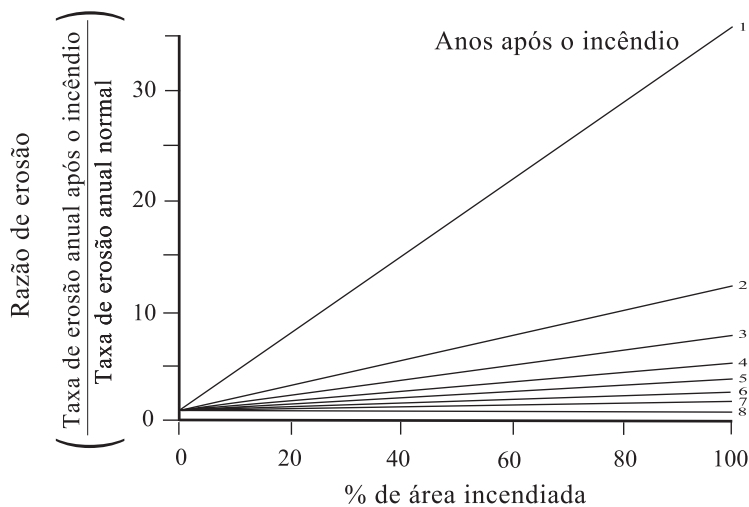
- a exposição das encostas que condiciona a insolação e a evaporação, afectando também a temperatura do solo. Esta condiciona, por sua vez, a taxa de mineralização da matéria orgânica, a evapotranspiração e, conseqüentemente, o teor médio de humidade do solo controlando assim de forma indirecta, a sua erodibilidade;
- a localização geográfica (latitude, distância ao mar) e altitude do local têm influência indirecta sobre a erodibilidade do solo, na medida em que estes parâmetros têm efeitos sobre os elementos do clima: temperatura, precipitação, regime de ventos, entre outros.

#### – A vegetação

A vegetação é o principal factor de protecção do solo contra a erosão hídrica. A acção protectora da vegetação reparte-se pela intercepção directa das gotas de chuva<sup>25</sup> (diminuindo os efeitos do seu impacto directo no solo), e pela inibição, retardamento ou redução da intensidade do escoamento superficial. Este último efeito é obtido à custa da melhoria das condições de infiltração da água, manutenção da rugosidade da superfície do solo, redução da velocidade de escoamento superficial (os caules das plantas constituem verdadeiros obstáculos para esse escoamento) e favorecimento da agregação das partículas. Mais ainda, as massas radiculares ajudam à imobilização do solo e facilitam a percolação da água. A eficiência da protecção oferecida pela vegetação varia com a densidade do coberto vegetal e com o tipo de vegetação presente. De facto, cada tipo de vegetação tem características morfológicas próprias bem como um desenvolvimento vegetativo ao longo do ano que difere de espécie para espécie. A protecção é mais eficiente no caso de espécies vegetais cuja folhagem se distribua de forma a dar boa cobertura ao solo e cujo ciclo vegetativo garanta a permanência dessa folhagem durante a estação húmida. São pouco protectoras as espécies cultivadas em regime primaveril (que deixam o solo nu durante o Inverno) ou as que se cultivam sempre em linha. O efeito protector da vegetação é ilustrado na figura 2.10 onde se relacionam dados obtidos em bacias hidrográficas da região de Los Angeles que perderam o seu coberto vegetal em incêndios. Esta figura mostra que a taxa de erosão normal pode ser multiplicada por um factor de trinta no período que sucede imediatamente o incêndio<sup>26</sup>, embora posteriormente haja uma nítida desaceleração da erosão hídrica, à medida que o coberto vegetal se restabelece.

<sup>25</sup> A intensidade da intercepção varia muito à superfície do planeta mas estima-se que possa ser 15 a 25% da precipitação anual em florestas temperadas e 20 a 25% da precipitação anual em florestas tropicais, reduzindo-se praticamente a zero em climas áridos ou semiáridos.

<sup>26</sup> Durante o incêndio não só ocorre a destruição da vegetação como há a criação de solos repelentes à água através do revestimento das partículas com substâncias orgânicas hidrófobas. Esta modificação reduz a capacidade de infiltração e acelera igualmente a erosão.



**Figura 2.10** – Relação entre a proporção de área incendiada e a razão de erosão após um incêndio, na região de Los Angeles (montanhas San Gabriel).

#### – Acções antrópicas

A destruição da vegetação natural, efectuada pelo Homem com vista à sua substituição por espécies agrícolas conduz habitualmente à intensificação do processo de erosão. A acção do Homem pode, no entanto, ser concebida no sentido de diminuir este efeito quando uma parcela de terreno é convertida em exploração agrícola. Técnicas de conservação do solo são aplicadas desde o século XVIII e na actualidade existe uma grande diversidade de soluções para conseguir este efeito, embora algumas possam ser dispendiosas. Envolvem a diminuição da velocidade de escoamento do agente erosivo (a fim de lhe minimizar a capacidade de carga sedimentar) e/ou a protecção contra o impacte directo das gotas de chuva. De entre as últimas podem citar-se a permanência de restolho após a ceifa, sementeiras múltiplas (intermédias entre dois cultivos, para maximizar a cobertura do solo ao longo do ano), a rotação das culturas ou mesmo a reflorestação. A acção do vento pode ser reduzida por obstáculos (vedações artificiais ou cortinas de árvores), implantados em alinhamentos perpendiculares à direcção dos ventos dominantes. As culturas dispostas em faixas, alternando plantas com diferentes alturas, reduzem também a velocidade média do vento junto ao solo devido ao aumento da rugosidade da superfície. Embora estas soluções não anulem a mobilização erosiva do solo, reduzem a distância percorrida pelas partículas, impedem-nas de ultrapassar os limites da área de cultivo e permitem a sua recuperação e redistribuição periódicas. A adopção de processos de lavra e de cultivo paralelos às curvas de nível (eficaz apenas em declives inferiores a 8%) ou o terraceamento de taludes que são cortados para obter declives menores (eficaz em declives elevados) efectuado perpendicularmente à direcção de escoamento regional cria uma

superfície estriada que diminui a velocidade média do escoamento superficial, aumenta a capacidade de infiltração e permite um melhor aproveitamento e conservação da água e do solo. Podem ainda utilizar-se geotexteis para simular uma cobertura vegetal. Estes ajudam a manter a humidade do solo e favorecem o crescimento das sementes ao mesmo tempo que reduzem a perda de solo.

## Quantificação da erosão hídrica do solo

Desde a década de 30 que vários investigadores compilaram informação experimental sobre os processos, variáveis e taxas de erosão dos solos com o objectivo de desenvolver uma equação empírica, útil na previsão das taxas de erosão em diferentes condições ambientais. A relação experimental entre factores de erosividade e erodibilidade do solo mais utilizada é a Equação Universal de Perda de Solo. Esta equação pode ser utilizada para estimar a intensidade de erosão típica de uma determinada área, ajudando a estabelecer as práticas de conservação necessárias para manter a perda do solo abaixo de um limite tolerável, habitualmente designado como “valor T”. A perda tolerável para um dado solo é o máximo valor da intensidade de erosão que este pode suportar, mantendo simultaneamente nível elevado de produtividade. Por outras palavras, T representa a máxima perda de solo que permite a sustentação de um determinado cultivo. Nos E.U.A., o valor de T varia entre 2,5 e 15 ton/ha/ano, consoante o tipo de solo, a sua taxa de renovação, o tipo de clima e a cobertura vegetal.

Embora a “produção de sedimentos” e a “erosão do solo” sejam fenómenos distintos, eles estão intimamente relacionados, sendo o primeiro obviamente consequência directa do segundo. Daí que se possa também utilizar este modelo para a produção de sedimentos de uma bacia hidrográfica, veiculada para jusante através da rede fluvial.

A Equação Universal da Perda do Solo (USLE – Universal Soil Loss Equation), foi proposta por Wischmeier e Smith em 1978 e pretendia ser uma equação de âmbito geograficamente universal:

$$A = R K L S C P^{27}, \text{ em que:}$$

A é a perda de solo média anual (também designada por erosão específica), R é o factor climático (factor de erosividade da chuva), K é o factor de erodibilidade do solo, L e S são factores topográficos (L traduz o efeito do comprimento da encosta e S traduz a influência do declive), C traduz a influência do coberto vegetal e P exprime a protecção fornecida pelas técnicas de conservação do solo (também por vezes referido como factor antrópico). Trata-se, pois, de um modelo multiplicativo extremamente simples que se baseia no cômputo e tratamento parcelar de cada um dos factores considerados mais

<sup>27</sup> Existe uma equação semelhante para quantificar a erosão eólica:  $E = IKCLV$ , em que E é a erosão potencial, I o índice de erodibilidade do solo, K o factor de rugosidade da superfície, C o factor climático (descreve a velocidade e duração do vento), L o comprimento da superfície nua medido paralelamente à direcção principal do vento e V descreve o coberto vegetal.

---

relevantes na determinação da intensidade do processo erosivo. É apenas necessário quantificar cada um desses factores por forma a que, uma vez multiplicados, se obtenha o valor de perda de solo provável. A principal dificuldade de aplicação da USLE reside precisamente na quantificação dos factores, tarefa geralmente difícil, morosa e dispendiosa. Diversos autores propuseram modificações à USLE no sentido da sua simplificação e outros propuseram modelos empíricos alternativos, mais simples e de aplicação mais imediata (Fournier, 1960; Langbein e Schumm, 1958; Teixeira e Andrade, 1997). Os ensaios de comparação entre valores de perda de solo previstos e medidos em talhões experimentais, ou através do assoreamento de albufeiras, têm produzido resultados muito animadores, sendo os valores preditos geralmente superiores aos observados, conduzindo a uma sobrevalorização da perda de solo, o que é sem dúvida preferível, em termos cautelares, a um erro por defeito.

Em Portugal continental, a aplicação de modelos empíricos aponta os valores de erosão mais baixos na região limítrofe do estuário do Tejo e os valores mais elevados concentrados em duas áreas: a norte, entre Vila Real, Lamego e Viseu e a sul, na zona este algarvia.

## **Actividades**

1. O que se entende por revolução verde?
2. Na sua opinião, no próximo século será mais efectivo investir em produção alimentar ou em planeamento familiar? Porquê?
3. Quais são as estratégias básicas que se podem seguir para aumentar a produção alimentar mundial?
4. Na região onde habita existem conflitos no uso do solo entre a agricultura e outras actividades? Se sim, são tomadas algumas iniciativas para os resolver?
5. Esquematize um perfil do solo indicando os diversos horizontes, a zona de eluviação e de iluviação.
6. Porque é que as plantas não podem crescer facilmente em substratos parcialmente meteorizados se a parte superior dos solos for erodida?
7. Porque é que a degradação do solo é um assunto tão importante?
8. O que pode causar a degradação dos solos?

- 
9. Suponha uma taxa de erosão média dos solos de 5mm/ano e uma taxa de formação média de solos de cerca de 0,02 a 0,11mm/ano. Considerando a formação do solo como um “input” e a erosão do solo como um “output” qual o decréscimo que se verifica anualmente? Assumindo que o solo tem 2m de espessura, em quantos anos ficará completamente destruído pela erosão?
  10. Cite e descreva brevemente três estratégias para reduzir a erosão dos solos.
  11. Discuta as consequências a longo prazo do facto das taxas correntes de erosão dos solos excederem as da sua formação.

## **Bibliografia**

ADRIANO, D. C.

1986 *Trace elements in the terrestrial environment*. Springer-Verlag, 533 p.

ARMS, K.

1990 *Environmental science*. Saunders College Publishing, 468 p.

BLATT, Harvey

1997 *Our Geologic Environment*. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 541 p.

COATES, D. R.

1981 *Environmental Geology*. John Wiley & Sons, 701 p.

COUTO, L. T. e Rocha, J. S.

1986 *Métodos de previsão da erosão hídrica continental. Aplicabilidade das equações de Fournier em Portugal*. LNEC, 37 p.

CUNNINGHAM, W. P. e SAIGO, B. W.

1995 *Environmental Science. A global concern*. 3.<sup>a</sup> edição. WCB Publishers, 612 p.

FORUM AMBIENTE

1996 “Pesticidas. Portugal entre os primeiros”. In: *Essencial do Ambiente-Poluição*, pp. 86-89.

- 
- 1996 “Desertificação. A longa marcha dos desertos”. In: *Essencial do Ambiente-Recursos Naturais*, pp. 22-27.
- FOURNIER, F.  
1960 *Climat et érosion*. Presses Universitaires de France, Paris, 201 p.
- LANGBEIN, W. B. e SCHUMM, S. A.  
1958 *Yield of sediment in relation to mean annual precipitation*. Trans. Am. Geophys. Union, vol. 39, n.º 6, pp. 1076-1084.
- MANAHAN, S. E.  
1994 *Environmental Chemistry*. Lewis Publishers, 799 p.
- McKINNEY, M. L. e SCHOCH, R. M.  
1998 *Environmental Science. Systems and Solutions*. Jones and Bartlett Publishers, 639 p.
- MERRITTS, D.; WET, A. e MENKING, K.  
1997 *Environmental Geology. An Earth System Science Approach*. W. H. Freeman and Company, New York, 452 p.
- MILLER, R. W. e DONAHUE, R. L.  
1995 *Soils in our environment*. Prentice Hall, 649 p.
- MORAN, J. M.; MORGAN, M. D. e WIERSMA, J. H.  
1986 *Introduction to Environmental Science*. W. H. Freeman and Company, 2.ª edição, 709 p.
- MONTGOMERY, C. W.  
1995 *Environmental Geology*. 4.ª edição, WCB Publishers, 496 p.
- MURCK, B. W.; SKINNER, B. J. e PORTER, S. C.  
1996 *Environmental Geology*. John Wiley & Sons, Inc., 535 p.
- TEIXEIRA, S. B. e ANDRADE, C.  
1997 *Quantificação da erosão hídrica em Portugal Continental*. *Recursos Hídricos*, vol. 18, n.º 1, pp. 25-43.

---

THOMPSON, G. R. e TURK, J.

1993 *Earth Science and the Environment*. Saunders College Publishing, 622 p.

TURK, J. e THOMPSON, G. R.

1995 *Environmental geoscience*. Saunders College Publishing, 428 p.

WISCHMEIER, W. H. e SMITH, D. D.

1978 “Predicting rainfall erosion losses – a guide to conservation planning”. In: *Agricultural Handbook*, 537, United States Department of Agriculture, 58 p.

### **Endereços eletrônicos**

<http://www.pedosphere.com/>

<http://www.uia.org/uiademo/str/j5666.htm>

---

### **3. Recursos hídricos**

Página intencionalmente em branco

---

## SUMÁRIO

---

- 3.1 **Introdução**
- 3.2 **O ciclo hidrológico**
- 3.3 **Principais reservatórios de água superficial**
  - 3.3.1 *Atmosfera*
  - 3.3.2 *Oceanos*
  - 3.3.3 *Glaciares, gelo e neve*
  - 3.3.4 *Pântanos e sapais*
  - 3.3.5 *Zona não saturada do solo*
  - 3.3.6 *Lagos*
  - 3.3.7 *Rios*
- 3.4 **Reservatórios de água subterrânea**
  - 3.4.1 *Aquíferos*
  - 3.4.2 *Características dos aquíferos*
    - 3.4.2.1 Porosidade
    - 3.4.2.2 Permeabilidade ou condutividade hidráulica
  - 3.4.3 *Fontes de água subterrânea*
    - 3.4.3.1 Nascentes
    - 3.4.3.2 Poços
- 3.5 **Impactes devidos à exploração da água superficial**
- 3.6 **Impactes devidos à exploração da água subterrânea**
  - 3.6.1 *Depleção do reservatório subterrâneo*
  - 3.6.2 *Compacção e subsidência*
  - 3.6.3 *Intrusão salina*
- 3.7 **Qualidade da água**
  - 3.7.1 *Influências naturais*
  - 3.7.2 *Fontes poluidoras pontuais e não pontuais*
  - 3.7.3 *Poluição da água superficial*
    - 3.7.3.1 Efluentes com carência bioquímica de oxigénio
    - 3.7.3.2 Nutrientes
    - 3.7.3.3 Agentes infecciosos
    - 3.7.3.4 Substâncias químicas orgânicas
    - 3.7.3.5 Substâncias químicas inorgânicas
      - Metais pesados
      - Ácidos
      - Bases
    - 3.7.3.6 Poluição térmica
    - 3.7.3.7 Sólidos em suspensão
    - 3.7.3.8 Radioactividade

- 
- 3.7.4 *Poluição da água subterrânea*
  - 3.7.4.1 Poluentes da água subterrânea
    - Agentes patogênicos
    - Substâncias químicas orgânicas e inorgânicas
  - 3.7.5 *Comportamento dos contaminantes na água subterrânea*
  - 3.7.5.1 Decaimento e decomposição
  - 3.7.5.2 Tempo de residência
  - 3.7.5.3 Transporte dos contaminantes
  - 3.7.5.4 Interação e sinergismo
  - 3.8 **Aumento dos recursos hídricos**
  - 3.8.1 *Despoluição da água subterrânea*
  - 3.8.2 *Dessalinização*

---

## Objetivos

- Apreender a importância do ciclo hidrológico e relacioná-lo com os principais reservatórios de água;
- Conhecer os principais reservatórios de água subterrânea;
- Definir aquífero, caracterizar os diferentes tipos de aquíferos e conhecer as suas características;
- Caracterizar as principais fontes de água subterrânea;
- Descrever os impactos da sobreexploração da água superficial e subterrânea;
- Conhecer as fontes poluidoras da água superficial e subterrânea.

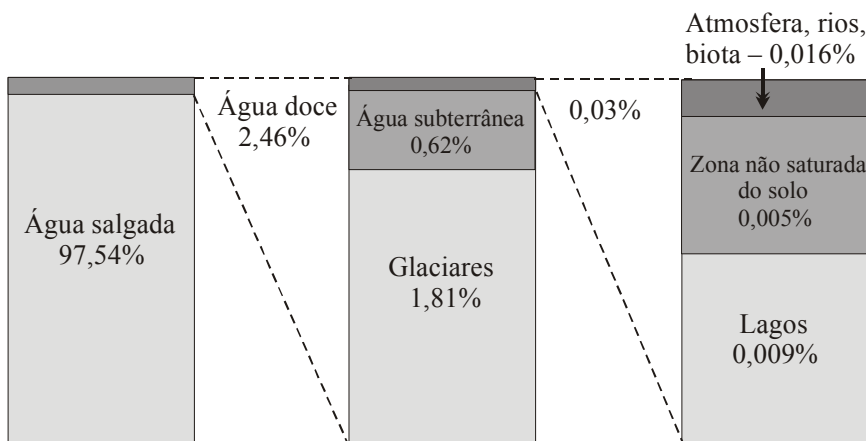
**Palavras-chave:** Ciclo hidrológico, reservatórios de água, água superficial, água subterrânea, tempo de residência, nível freático, zona vadosa, aquífero livre, aquífero confinado, zona de recarga, poço artesiano, porosidade, produção específica, permeabilidade, gradiente hidráulico, Lei de Darcy, cone de depressão, intrusão salina, subsidência, poluição, fontes poluidoras pontuais, fontes poluidoras não pontuais, contaminantes miscíveis, contaminantes imiscíveis, dessalinização.

Página intencionalmente em branco

### 3.1 Introdução

Embora do ponto de vista geológico a água seja um recurso renovável, na medida em que é continuamente reciclada através do ciclo hidrológico, a sua disponibilidade é muito variável de lugar para lugar e mesmo extremamente limitada a curto prazo em muitas partes do mundo. Efectivamente, a procura de água doce excede a sua disponibilidade em muitos países do Mundo, principalmente em África e no Médio Oriente devido ao crescimento populacional, à distribuição e variação climática (principalmente do regime de precipitação), à poluição e à melhoria da qualidade de vida. A escassez de água foi a preocupação ambiental dominante do final do milénio e a sua conservação pode ser a grande prioridade desta década, tal como a do consumo de energia foi nos anos 70.

A Terra é o único planeta do sistema solar onde a água líquida existe em quantidades substanciais. A Hidrosfera cobre mais de 70% da superfície terrestre, totalizando um volume de 1404 milhões de km<sup>3</sup>. Se a Terra tivesse uma superfície plana e regular, este volume formaria um oceano global com cerca de 3km de profundidade. Desta quantidade imensa, cerca de 97,54% é água salgada e 1,81% encontra-se retida nas calotes de gelo da Antárctida e da Gronelândia, sendo portanto inacessível. Apenas 0,65% daquele volume é água doce e acessível em rios, lagos e reservatórios subterrâneos (Fig. 3.1).

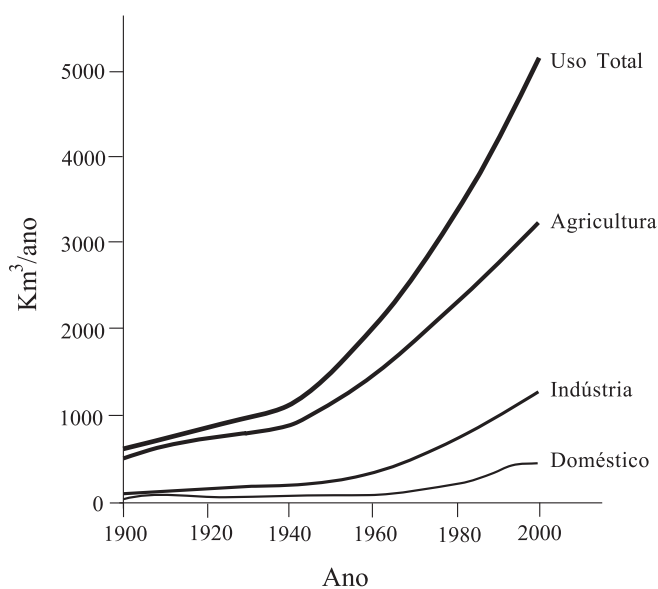


**Figura 3.1** – Distribuição percentual de água doce e salgada na superfície terrestre.

A água é um recurso vital, pois, em contraste com outros recursos naturais, não existe substituto para a maioria das suas funções. Além do facto de corresponder a aproximadamente 70% da nossa massa corporal, a água é crucial para a vida moderna: os transportes, a geração de energia, a produção e processamento de alimentos, as manufacturas ou os sistemas de esgotos, entre outros exemplos, não poderiam simplesmente funcionar ou existir na ausência de água.

A maior parte da água é empregue pelo Homem de um modo não destrutivo e devolvida ao sistema de circulação natural de forma a poder ser reutilizada. Define-se, pois, consumo de água como a fracção da água total que não é devolvida em tempo útil ao sistema de circulação de onde proveio, na medida em que é “perdida” por evaporação, absorção, transformação química ou outro processo destrutivo. Considera-se degradada aquela que sofreu modificação da qualidade devido a contaminação ou poluição e se tornou inapropriada para uso corrente. A quantidade total desta água pode permanecer constante mas a sua qualidade foi degradada e por isso não é tão valiosa como era. A água consumida e degradada perfaz cerca de metade do volume total possível de ser utilizado em muitas sociedades industriais.

A utilização da água cresceu duas vezes mais rapidamente que o aumento populacional no último século (Tabela 3.1, Fig. 3.2) e quadruplicou nos últimos 50 anos. Actualmente, estima-se em 650-700m<sup>3</sup>/pessoa/ano o consumo médio mundial de água – os países com grande abundância de água e não muito populosos (como o Canadá, a Nova Zelândia ou a Islândia), têm uma disponibilidade anual per capita de muitos milhares de metros cúbicos; em contraste, no Egipto, a quantidade de água doce disponível é de apenas 20m<sup>3</sup>/pessoa/ano. Na primeira metade da década de 90 exploravam-se para uso humano cerca de 4400km<sup>3</sup>/ano ou seja, oito vezes o caudal anual do Rio Mississipi (17,3 x 10<sup>3</sup>m<sup>3</sup>/s). À taxa actual de crescimento demográfico, as necessidades de água doce duplicarão cada 21 anos, mas o volume total existente seria suficiente para suportar 20 mil milhões de pessoas se essa água estivesse proporcionalmente distribuída pelos diversos continentes (Tabela 3.2), o que não acontece de facto devido à variabilidade climática e às condições geológicas de cada região.



**Figura 3.2** – Crescimento do consumo de água total e nos diversos sectores no século XX.

**Tabela 3.1** – Consumo anual de água em diversas regiões do Mundo no último século.

Consumo anual (milhas cúbicas)					
Região	1900	1950	1990	2000	Aumento: 1900-2000 (nº vezes)
Ásia	99	206	58	800	8
América do Norte	19	69	174	191	10
Europa	9	23	133	162	18
África	10	13	56	80	8
América do Sul	3,6	14	36	52	14
Austrália/Oceânia	0,5	2,4	9,1	11	22
Total	141,1	327,4	994,1	1292	9

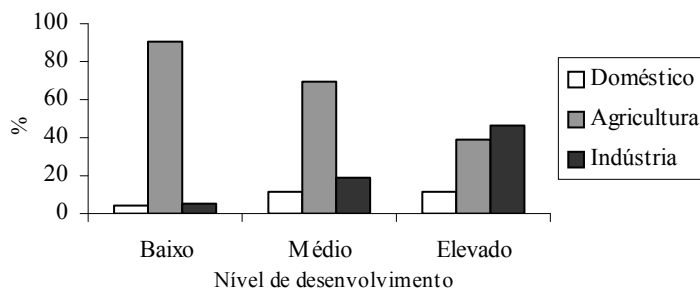
A utilização da água distribui-se por três sectores de uso principais: público (doméstico), industrial e agrícola. Em média mundial, a agricultura (irrigação) consome cerca de 73%<sup>1</sup> do volume total. Este valor representa 93% do total da água usada na Índia (ou na maioria dos países africanos) mas apenas 4% no caso do Kuwait, que restringe forçosamente a utilização deste recurso, limitado, em campos agrícolas. Nos países mediterrâneos, a agricultura consome cerca de 80% da água na Grécia, 70% na Turquia, 65% em Espanha e cerca de 50% em Itália e Portugal, contrastando fortemente com o resto da Europa onde, em média menos de 10% dos recursos hídricos são usados para irrigação. A indústria é responsável por cerca de 21% do consumo de água mundial; este valor representa 70% da água total em alguns países desenvolvidos europeus, tais como a Alemanha, mas apenas 5% em países menos industrializados como o Egipto ou a Índia. As centrais nucleares são as unidades que mais água utilizam (para refrigeração), sendo responsáveis por 50 a 100% do uso industrial em alguns países. No entanto, deste total, apenas uma pequena fracção é consumida ou degradada (2 a 5%).

<sup>1</sup> A nível mundial, é a indústria o sector que utiliza maior quantidade de água mas é a agricultura o maior consumidor.

**Tabela 3.2** – Volume anual de água doce nos rios de diversos continentes.

Continente	Volume (km <sup>3</sup> )	Percentagem do total
Europa	76	4
Ásia	533	27
África	184	9
América do Norte	236	12
América do Sul	946	47
Austrália	24	1
Total	1999	100

O abastecimento público é o sector de uso dominante em muitos países nórdicos da Europa Ocidental mas com menos importância relativa na Europa do Sul e de Leste. O grau de industrialização e o nível económico dos diferentes países condicionam a distribuição do uso da água pelos diferentes sectores de actividade (Fig. 3.3). Na tabela 3.3 exemplificam-se necessidades típicas de alguns usos domésticos (os quais são responsáveis por um consumo médio mundial de cerca de 6% do volume total de água), industriais ou agrícolas.



**Figura 3.3** – Consumo percentual de água nos diversos sectores, em países de baixo, médio e elevado nível de desenvolvimento.

**Tabela 3.3** – Exemplos de utilização da água.

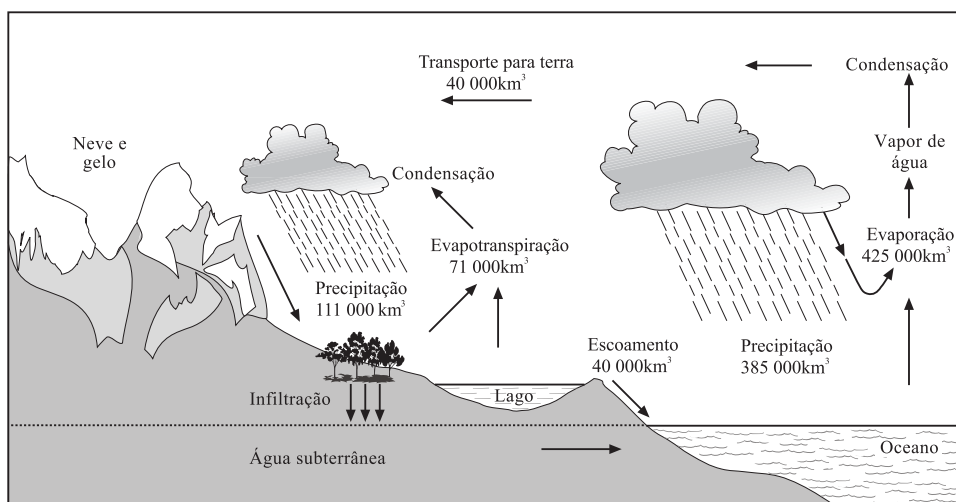
Sector doméstico	Litros	Agricultura e processamento de alimentos	Litros	Indústria	Litros
Banho	100-150	1 ovo	150	1 jornal	1000
Duche	20/minuto	1 espiga de milho	300	1 automóvel	380000
Lavagem de roupa	75-100	1 pão	600	450g <sup>2</sup> de aço	110
Confecção de alimentos	30	450g <sup>2</sup> de carne de vaca	3030-9500	450g <sup>2</sup> de borracha sintética	1100
Rega de jardim	40/minuto	1 copo de leite	380	450g <sup>2</sup> de alumínio	3800
Descarga de autoclismo	10-15	450g <sup>2</sup> de arroz	2120		

<sup>2</sup> O peso indicado resulta de uma aproximação da libra, unidade inglesa de peso equivalente a 453,6g.

### 3.2 O ciclo hidrológico

Toda a água, doce ou salgada, está interligada através do ciclo hidrológico, o qual descreve a sua circulação sobre e através da Terra (Fig. 3.4). O ciclo hidrológico inicia-se com a evaporação da água do oceano e o transporte subsequente do vapor de água pelas massas de ar em movimento. Parte deste

vapor condensa e origina precipitação sob forma de chuva, neve ou granizo. Uma pequena parte da água re-evapora durante os aguaceiros e outra é retida (efeito de intercepção) pela vegetação ou por superfícies impermeáveis (edifícios, estradas, etc.) voltando à atmosfera pouco tempo depois, em forma de vapor. Da água que alcança a superfície terrestre, uma parte fica retida temporariamente em pequenas poças, charcos e lagos, mas desta a maior parte retorna rapidamente à atmosfera por evaporação. Outra fracção da água circula à superfície e concentra-se em regatos e rios (escorrência superficial). Esta água será descarregada no oceano, de onde novamente se evapora, ou infiltrar-se-á no substrato (Fig. 3.4). Por último, uma terceira parte da precipitação penetra directamente na crosta através do solo – infiltração – preenchendo os poros ou fissuras deste meio poroso e do substrato rochoso. Excepto nas bacias endorreicas ou interiores das zonas áridas e semi-áridas quentes, a maior parte da escorrência (superficial e subterrânea) termina no oceano e por isso pode considerar-se que os oceanos são também o ponto final do ciclo hidrológico, num processo contínuo, no qual cada partícula de água evaporada do oceano, a ele regressa depois de passar pelas etapas de precipitação e escorrência, superficial ou subterrânea. As plantas têm uma importância fundamental no ciclo hidrológico, absorvendo água subterrânea e bombeando-a para a atmosfera através da transpiração que é, muitas vezes, mais intensa que a simples evaporação dos lagos, rios e da superfície do solo. De facto, um hectare de milho em crescimento transpira 35 000 l/dia e nas florestas tropicais, cerca de 75% da precipitação anual é devolvida à atmosfera pela transpiração das plantas.



**Figura 3.4** – Ciclo hidrológico.

A quantidade total de água na Terra permanece praticamente invariante ao longo do tempo, embora existam aportes de água “nova” designada “juvenil”,

que provém do vapor libertado pelas erupções vulcânicas. Esta adição é compensada pelas perdas de vapor na alta atmosfera, que é decomposto pela radiação solar em oxigénio e hidrogénio.

O ciclo hidrológico tem um papel vital no fornecimento permanente de água doce e na manutenção de um clima global habitável. O movimento permanente da água depende da energia solar para a evaporação ou sublimação<sup>3</sup> e da gravidade que permite a precipitação e a sua deslocação das zonas mais elevadas para as mais baixas. Evaporação e sublimação recriam água doce, exsolvando sais e outros contaminantes num processo que se pode considerar de destilação em grande escala. Cada ano, o sol evapora aproximadamente 496 000km<sup>3</sup> de água da superfície da Terra<sup>4</sup>. 90% do volume evaporado do oceano volta a cair neste sob a forma de chuva; os restantes 10% são transportados pelos ventos sobre os continentes, onde se combinam com a água ali transpirada ou evaporada para perfazer uma precipitação total de cerca de 111 000km<sup>3</sup> (Tabela 3.4).

<sup>3</sup> Em dias frios e ventosos de Inverno, quando o ar está muito seco, os bancos de neve desaparecem por sublimação mesmo que a temperatura atinja valores acima do ponto de congelação.

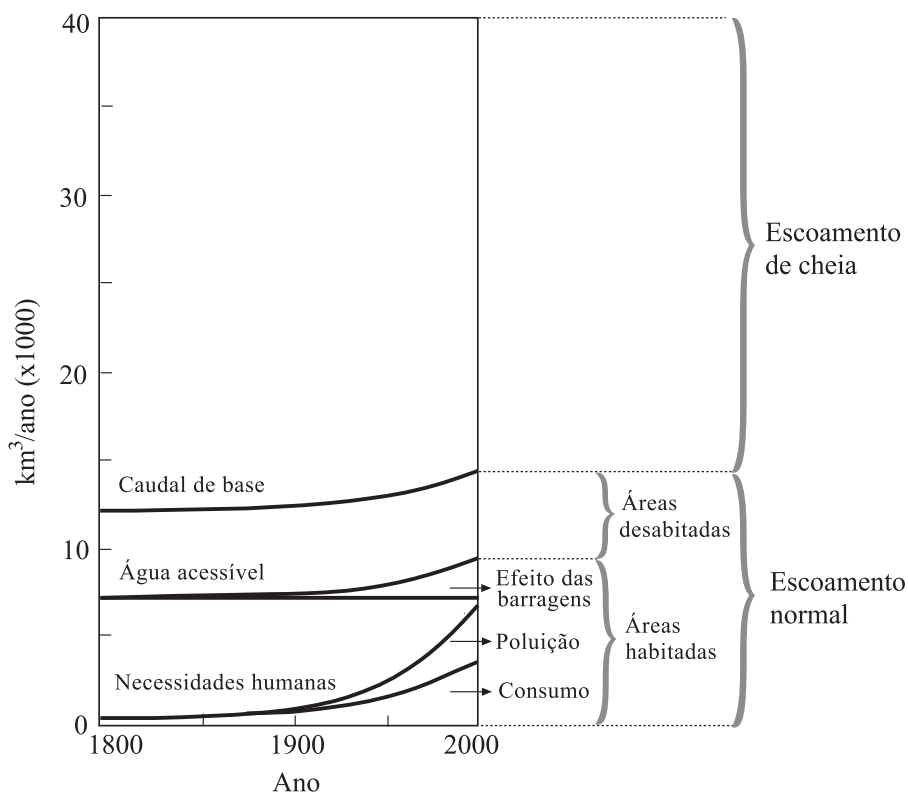
<sup>4</sup> Esta evaporação é maior nos trópicos do que em latitudes mais elevadas e sobre os oceanos (86%) do que sobre a terra.

**Tabela 3.4** – Balanço entre precipitação e evaporação nos continentes e oceanos.

	Precipitação (km <sup>3</sup> )	Evaporação (km <sup>3</sup> )
Continente	111 000	71 000
Oceano	385 000	425 000
Total (km <sup>3</sup> )	496 000	

O excesso de água nos continentes – 40 000km<sup>3</sup> (diferença entre a precipitação e a evaporação) – é incorporado pelas plantas e animais nos seus tecidos, infiltrado e armazenado como água subterrânea ou escoada à superfície. Esta quantidade representa o fornecimento anual renovável, disponível para uso humano e para sustentar os ecossistemas dependentes de água doce. Estima-se que cerca de 9 000km<sup>3</sup> daquele excesso sejam acessíveis sob a forma de fornecimento duradouro e previsível, como caudais fluviais médios que podem potencialmente ser usados ano após ano. Os outros 31 000km<sup>3</sup> são inacessíveis porque se perdem como caudais de cheia<sup>5</sup> ou escoam em áreas desabitadas (Fig. 3.5). A mesma figura sugere que no ano 2000 as necessidades humanas igualaram as reservas da água acessível e que metade desta foi degradada devido à poluição.

<sup>5</sup> A maior parte da água doce escoada sobre os continentes ocorre em regime de cheia e é inacessível devido à incapacidade de previsão daqueles eventos e fraca rentabilidade do investimento necessário para a sua captura.



**Figura 3.5** – Acessibilidade da água doce.

O ciclo hidrológico assegura uma redistribuição global do calor que é essencial para a manutenção de temperaturas relativamente constantes; sem oceanos para absorver, armazenar ou ceder calor, e correntes atmosféricas para o redistribuir, a Terra experimentaria amplitudes de variação térmica diária extremas, semelhantes às da Lua (entre +100°C e -130°C). O calor específico da água é muito elevado (2258kJ/kg) e por essa razão, a amplitude de variação térmica do oceano é inferior à da terra, contribuindo para a sua função reguladora do clima global.

A distribuição da água é muitas vezes descrita em termos de reservatórios interactivos no interior dos quais a água reside por períodos de extensão variável. A tabela 3.5 mostra os principais reservatórios e o tempo médio de residência<sup>6</sup> da água em cada um deles.

<sup>6</sup> O tempo médio de residência é o tempo que, em média, cada molécula de água permanece num dado compartimento do ciclo hidrológico.

**Tabela 3.5** – Principais reservatórios de água – volume estimado e tempo de residência médio.

	Volume (milhares de km <sup>3</sup> )	Tempo de residência médio
Atmosfera	13	8 a 10 dias
Oceano	1 370 000	3 000 a 30 000 anos <sup>(4)</sup>
Glaciares, gelo e neve	29 000	1 a 16 000 anos
Pântanos e sapais	3,6	Meses a anos
Zona não saturada do solo <sup>(1)</sup>	130	Semanas a 1 ano
Lagos <sup>(2)</sup>	229	1 a 100 anos
Rios	1,7	10 a 30 dias
Água subterrânea <sup>(3)</sup>	4 000	Dias a milhares de anos
Total	1 403 377	2 800 anos

- (1) Incluindo a humidade de plantas e animais.  
 (2) Incluindo os lagos salgados.  
 (3) Até à profundidade de 1km.  
 (4) Depende, entre outros factores, da profundidade.

### 3.3 Principais reservatórios de água superficial

#### 3.3.1 *Atmosfera*

A atmosfera é um reservatório menor de água (contém menos de 0,001% do total) e tem também dos menores tempos de residência. Equivale a 25mm de precipitação, o suficiente para produzir um aguaceiro de intensidade média durante algumas horas. Como o valor médio anual da precipitação global é de 1000mm (equivalente a uma média diária de 2,7mm), o tempo de residência de uma molécula de água na atmosfera é de 8 a 10 dias.

#### 3.3.2 *Oceanos*

Os oceanos são o maior reservatório de água do planeta (97% do volume total) mas a água do mar é demasiado salgada para uso humano: contém 3,5% de substâncias dissolvidas (Tabela 3.6) enquanto a água potável não deve exceder 1% e a generalidade da indústria requer salinidade ainda inferior pois o sal pode destruir a maquinaria. O cloreto de sódio é o componente dissolvido mais abundante, perfazendo cerca de 86% do total de sais. O tempo de residência médio da água no oceano é da ordem de três milhares de anos. Nos estratos mais profundos, onde o movimento é praticamente inexistente, o tempo

de residência eleva-se a 30 000 a 40 000 anos – Tabela 3.5); porém, nos estratos mais superficiais, o tempo de residência médio é da ordem dos 100 a 150 anos.

**Tabela 3.6** – Principais substâncias dissolvidas na água do mar.

Ião	Concentração na água (‰)	% do total de sais dissolvidos
Cloro	19	55
Sódio	11	31
Sulfato	3	8
Magnésio	1	3
Cálcio	0,5	1
Potássio	0,5	1
Total	35	99

### 3.3.3 *Glaciares, gelo e neve*

Cerca de  $\frac{3}{4}$  da água doce está retida sob forma de gelo em glaciares de montanha, calotes circumpolares e em campos de neve, principalmente na Gronelândia e na Antártida, constituindo a maior reserva de água doce da hidrosfera, 200 vezes superior ao volume de todos os lagos. A fusão total desta massa de água elevaria o nível do mar de 70m. O tempo de residência da água neste reservatório varia entre 1 e 16 000 anos (Tabela 3.5).

### 3.3.4 *Pântanos e sapais*

Os pântanos e os sapais têm um papel vital mas por vezes não reconhecido no ciclo hidrológico. Podem ser áreas de recarga importantes, pois o seu coberto vegetal estabiliza o solo e retarda o escoamento superficial, favorecendo a depuração da água e a sua infiltração nos reservatórios subterrâneos. Por esta razão, as áreas pantanosas são muitas vezes designadas como “os rins” do ciclo hidrológico. Quando as áreas pantanosas são drenadas, assoreadas ou perturbadas de qualquer outro modo, a sua capacidade natural de absorção de água diminui e o escoamento superficial intensifica-se, originando cheias e erosão durante a estação das chuvas e seca no resto do ano. Esta modificação tem efeitos desastrosos na diversidade e produtividade biológicas que são prejudicadas, bem como na eficiência de recarga dos aquíferos. O tempo de residência varia de meses a anos (Tabela 3.5).

### 3.3.5 Zona não saturada do solo

A humidade do solo é temporariamente armazenada em pequenos poros ou adsorvida à superfície dos grãos em solos não saturados, constituindo um reservatório menor, de difícil quantificação. O seu tempo de residência é necessariamente pequeno devido aos efeitos de evapotranspiração e de percolação por gravidade para a zona saturada.

### 3.3.6 Lagos

Os lagos<sup>7</sup> são unidades geomorfológicas efémeras à escala geológica, na medida em que o seu destino inexorável será o assoreamento completo ou a sua drenagem por meio do rompimento da barreira que os sustenta. Embora o volume de água dos lagos exceda em cerca de 100 vezes o reservatório fluvial, e esta água seja muito mais acessível que a água subterrânea ou a retida nos glaciares, os lagos constituem ainda um contribuinte menor do abastecimento de água mundial. O tempo de residência médio varia entre 10 e 100 anos.

<sup>7</sup> As características morfológicas dos lagos são muito diversificadas: as profundidades variam de alguns metros a mais de 1600m (Lago Baikal na Sibéria) e a superfície molhada varia desde menos de 0,5ha a centenas de milhares de km<sup>2</sup> em grandes mares interiores como o Lago Superior (E. U. A) ou o Mar Cáspio.

### 3.3.7 Rios

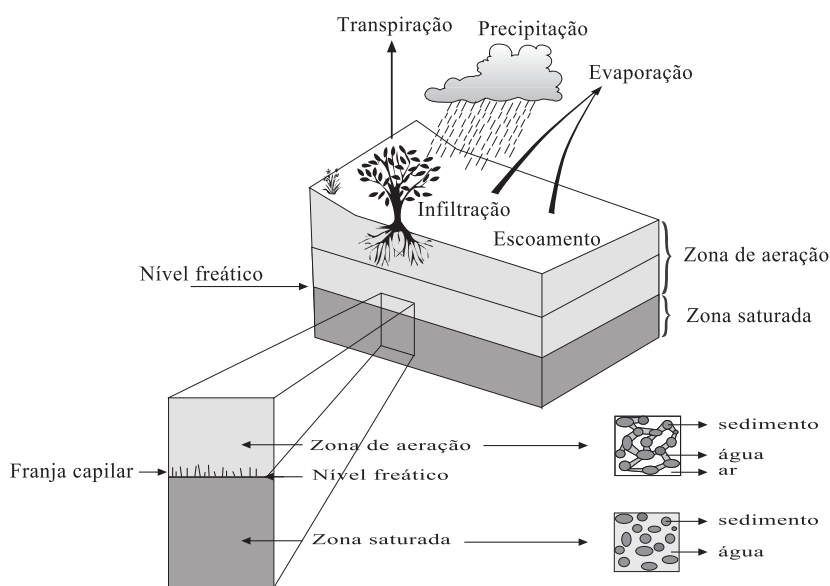
Embora a quantidade total de água contida num dado intervalo de tempo num rio seja pequena quando comparada com outros reservatórios (Tabela 3.5) as águas fluviais têm importância vital para consumo humano e para muitos outros organismos. A capacidade de abastecimento a partir de um rio pode avaliar-se pelo seu caudal, ou seja, o volume debitado através de uma secção de controle por unidade de tempo, geralmente expresso em m<sup>3</sup>/s ou l/s. O tempo de residência varia entre 10 e 30 dias.

## 3.4 Reservatórios de água subterrânea

O segundo maior reservatório de água doce do planeta corresponde a água subterrânea<sup>8</sup>. A água subterrânea que se situa no primeiro km abaixo da superfície terrestre é, à escala global, economicamente recuperável e perfaz cerca de 0,28% do total existente na Terra. Uma vez infiltrada, a água flui lentamente por acção da gravidade através dos poros e fissuras do solo e das rochas permeáveis (Fig. 3.6). Os níveis mais superiores do solo, que contém ar e água preenchendo os poros, constituem a zona de aeração, zona não saturada ou zona vadosa. A humidade necessária às plantas provém principalmente desta zona, cuja espessura depende muito da quantidade da

<sup>8</sup> A água subterrânea pode ser armazenada até alguns km de profundidade na crosta. A maior profundidade, a pressão confinante fecha qualquer poro que a água subterrânea pudesse preencher.

precipitação, do tipo de solo e da topografia. Os níveis inferiores do solo, onde todos os espaços disponíveis estão preenchidos por água que aí chega por percolação, constituem a zona de saturação (zona saturada ou zona freática – Fig. 3.6) que constitui o reservatório de água subterrânea. A interface entre as zonas saturada e não saturada é uma superfície designada por superfície freática. A cota da superfície freática varia sazonalmente de acordo com as taxas de precipitação, de infiltração, de evapotranspiração ou com a remoção para uso antrópico. Na generalidade do globo a superfície freática localiza-se a profundidade inferior a 30m mas em regiões áridas pode alcançar algumas centenas de metros. Em sedimentos de textura fina, a superfície freática é coroada por uma faixa permanentemente humedecida por capilaridade, que normalmente tem menos de 60cm de espessura e invade a zona de aeração. É a chamada franja capilar (Fig. 3.6).



**Figura 3.6** – Corte esquemático da zona de aeração e saturada.

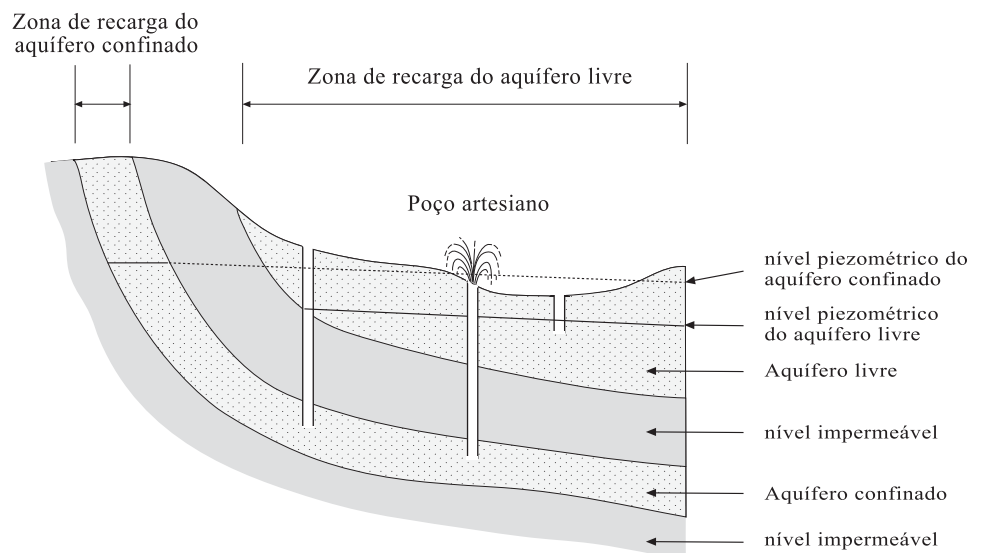
A aplicação da equação da continuidade ao ciclo hidrológico, descreve o balanço entre as taxas globais de precipitação, de evapotranspiração e de escoamento superficial e a quantidade de água disponível no solo e armazenada como água subterrânea – balanço hídrico:

- Fluxo de entrada = Fluxo de saída + variação da água armazenada, em que o fluxo de entrada provém da precipitação, o fluxo de saída da evapotranspiração e do escoamento superficial e a água armazenada corresponde à humidade do solo e ao reservatório subterrâneo. Por outras palavras, num sistema em equilíbrio, o fluxo de entrada iguala o fluxo de saída e não ocorre modificação da quantidade total de água armazenada. Se o fluxo de entrada exceder o fluxo de saída, a quantidade total de água armazenada aumenta e o reservatório cresce.

Pelo contrário, se o fluxo de entrada for inferior ao de saída, a quantidade total de água armazenada diminui e o reservatório decresce. Efectivamente, se a evapotranspiração exceder a precipitação, a vegetação tem que extrair água das reservas do solo para sobreviver, ocorrendo um déficit no teor de humidade do solo. Este déficit é a diferença entre a humidade remanescente e a capacidade de campo do solo, que por sua vez, é a quantidade de água retida no solo após drenagem do excesso (a quantidade de água que o solo pode reter). Só depois de satisfeita a capacidade de campo do solo, qualquer excesso de água se pode tornar recarga efectiva do reservatório subterrâneo.

### 3.4.1 *Aquíferos*

As rochas que armazenam e permitem a percolação da água no seu interior, permitindo o seu aproveitamento em quantidade economicamente apreciável, são chamadas aquíferos. O conceito de aproveitamento economicamente rentável da água subterrânea é muito relativo já que pode ser tão importante a obtenção de 100l/s (ou mais) para uma indústria de papel, como de 1l/s para satisfazer as necessidades básicas dos habitantes de uma pequena aldeia situada numa região árida. A água encerrada no interior de uma unidade geológica ocupa os poros disponíveis, que correspondem a espaços intergranulares ou fracturas, chamando-se aquíferos por porosidade aos primeiros e por fracturação aos segundos. Os aquíferos assentam necessariamente sobre um substrato impermeável que impede o escoamento da água através da sua base (Fig. 3.7). As áreas onde ocorre a infiltração da água que alimenta o aquífero são chamadas zonas de recarga (Fig. 3.7).



**Figura 3.7** – Corte esquemático de um aquífero livre e um aquífero confinado.

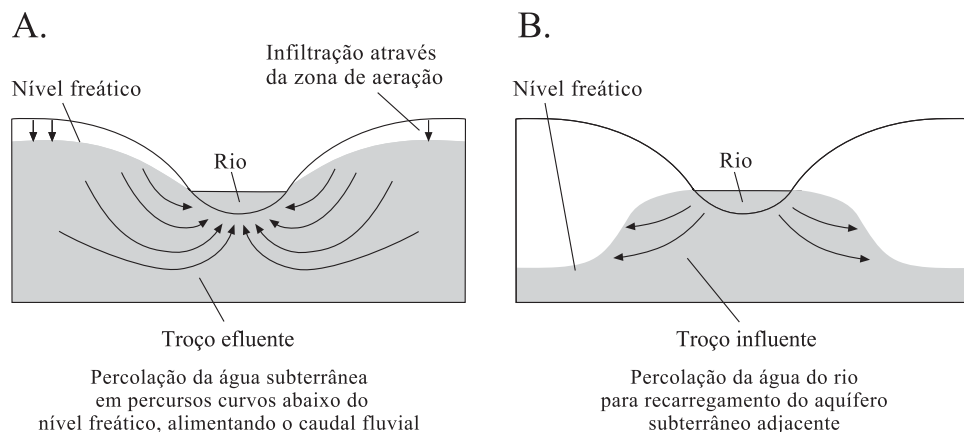
---

Um aquícludo é uma unidade geológica que contém água no seu interior, até à saturação, mas apresenta permeabilidade extremamente baixa, inibindo a sua percolação e conseqüentemente a sua exploração. Um aquítardo é uma unidade geológica (por exemplo, um nível de argilas siltosas ou arenosas) que, contendo quantidades apreciáveis de água, a transmite muito lentamente; por esta razão também não são aptos para captação e exploração mas, em condições particulares permitem alimentação lenta mas duradoura de aquíferos adjacentes, podendo ser elementos de recarga importantes.

De acordo com a pressão hidrostática da água encerrada nos aquíferos, estes podem classificar-se em:

- aquíferos livres (não confinados ou freáticos), nos quais a superfície freática contacta directamente com a atmosfera através da porosidade dos solos que estão por cima, estando portanto à pressão atmosférica (Fig. 3.7). Num poço ou furo que atravesse total ou parcialmente um aquífero livre, a água subirá até igualar a cota do nível freático local – Fig. 3.7. Um aquífero livre é recarregado por infiltração directa em toda a superfície por ele ocupada;
- aquíferos confinados ou cativos – são aquíferos enquadrados por rochas impermeáveis (níveis confinantes), em que a água subterrânea está submetida a uma pressão, superior à pressão atmosférica e ocupa a totalidade dos vazios do reservatório geológico que a contém, saturando-o completamente. O nível piezométrico situa-se acima do tecto do aquífero e eventualmente mais alto que a boca de um poço ou furo que o atravesse. Neste caso, diz-se que essa captação é artesianiana repuxante porque a água jorra sem ser necessário bombeá-la (Fig. 3.7);
- aquíferos semi-confinados – caso particular dos aquíferos confinados em que o muro (superfície inferior) ou o tecto (superfície superior) que os encerra, não é totalmente impermeável, funcionando como aquítardo.

Respondendo à solicitação da gravidade, a água subterrânea percola a favor da inclinação da superfície freática, em escoamento lento, até que encontra um local de descarga – um rio, um lago, o oceano. Por outro lado, a água tende a fluir das zonas de alta pressão para as de baixa pressão (Fig. 3.8), pelo que, em condições geométricas favoráveis, parte deste percurso se pode efectuar de baixo para cima, contrariando a gravidade. Contudo, em regiões áridas, as condições de recarga são mais complexas; o nível freático está muito abaixo da superfície topográfica e por isso a água dos rios ajuda a recarregar os aquíferos e a elevar o nível freático (Fig. 3.8). Designam-se por influentes os troços fluviais onde a água superficial é perdida por infiltração para o aquífero subjacente, e efluentes aqueles que são alimentados a partir da descarga forçada do aquífero.



**Figura 3.8** – Percurso da água subterrânea em regiões húmidas (A) e em regiões áridas (B).

<sup>9</sup> Tipicamente a água subterrânea flui em média 4cm/dia (ou seja, 15m/ano) embora as taxas de fluxo sejam muito variáveis.

O movimento da água através do subsolo desde a área de recarga até à área de descarga mais próxima, depende da distância e da taxa de fluxo<sup>9</sup>; o tempo de residência varia entre dias e milhares de anos.

### 3.4.2 Características dos aquíferos

Os atributos mais importantes que caracterizam o funcionamento (e o interesse económico) de um aquífero são a porosidade e a permeabilidade (a transmissividade é o produto da permeabilidade por uma espessura saturada), os quais governam a capacidade de acumulação, a velocidade de migração e os percursos de distribuição da água subterrânea.

#### 3.4.2.1 Porosidade

As rochas são essencialmente constituídas por uma fase sólida, mineral, mas na generalidade dos casos essa fase não esgota o volume ocupado pelo maciço rochoso. Tal deve-se à existência de espaços entre os grãos, cristais ou blocos que formam o maciço rochoso, a que se adicionam ainda os espaços resultantes da dissolução interna (pós-deposicional) ou inerentes à própria natureza de algumas partículas – por exemplo alguns bioclastos. Cada um destes espaços define um poro e a soma de todos estes espaços pode representar uma fracção importante do volume total ocupado pelo maciço rochoso. Os poros são, de modo geral, mais pequenos que o diâmetro da fase sólida da rocha, mas são em compensação muito numerosos pelo que podem armazenar um volume de fluido grande.

---

A porosidade determina assim a quantidade máxima de fluido que um dado volume de rocha pode conter. É expressa em % e determinada pela relação entre o volume de vazios (isto é, o volume dos poros ocupado por ar, água ou outro fluido) e o volume total. Num certo volume total de rocha pode distinguir-se:

- $V_s$  – volume da fase sólida;
- $V_v$  – volume de vazios;
- $V_t$  – volume total –  $V_v + V_s$ ;

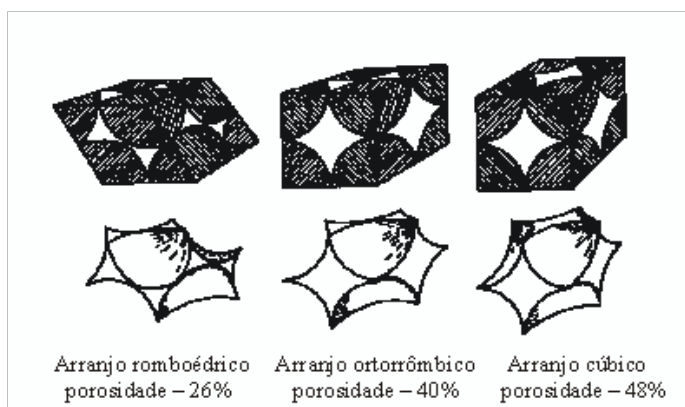
Assim, a porosidade ( $m$ ) será:

$$m\% = \frac{V_v}{V_t} \times 100$$

Do ponto de vista genético, importa distinguir a porosidade primária, contemporânea da formação da rocha (singenética) da porosidade secundária, desenvolvida após a formação da rocha, habitualmente pela diagénese ou tectónica. A porosidade primária é especialmente importante nas rochas sedimentares detríticas, nas quais os poros correspondem aos espaços definidos entre partículas (porosidade intergranular) ou mais raramente aos espaços existentes no interior das partículas. A porosidade secundária tem maior diversidade e, dos vários tipos possíveis, importa salientar: a porosidade induzida pela fraturação do maciço rochoso e a induzida pelo rearranjo volumétrico de vasas carbonatadas durante a diagénese e principalmente pela dolomitização, que origina a multiplicação de microcavernas no interior da textura em recristalização. A circulação de fluidos no interior do maciço rochoso explora as vias de escoamento definidas pelos poros e a actividade dessa água de circulação pode aumentar a porosidade total, por efeito de dissolução, ou pelo contrário, diminuí-la, se conduzir à cimentação ou preenchimento dos espaços disponíveis.

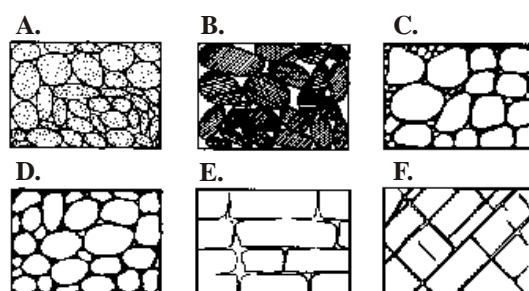
A porosidade depende de vários factores, dos quais se citam:

- a) a forma e dimensão dos grãos, que determinam a forma e dimensão dos poros;
- b) a disposição dos grãos em arranjos texturais mais ou menos abertos (Fig. 3.9);
- c) a calibragem dos grãos: a calibragem deficiente favorece a ocupação dos poros por partículas de menores dimensões, reduzindo a porosidade;
- d) a presença ou ausência de cimentação.



**Figura 3.9** – Empacotamentos densos de esferas iguais e respectivo valor de porosidade total.

A figura 3.10 ilustra algumas relações entre a textura das rochas e a porosidade:



- A – sedimento detrítico de granulometria homogênea (bem calibrado), formado por elementos porosos; porosidade inter e intragranular elevadas;
- B – sedimento detrítico de granulometria homogênea (bem calibrado) formado por elementos líticos não porosos; porosidade (intergranular) elevada;
- C – sedimento detrítico de granulometria heterogênea (mal calibrado); porosidade (intergranular) diminuta;
- D – depósito sedimentar de granulometria homogênea cuja porosidade original diminuiu por cimentação pós-deposicional;
- E – rocha porosa por dissolução;
- F – rocha porosa por fracturação.

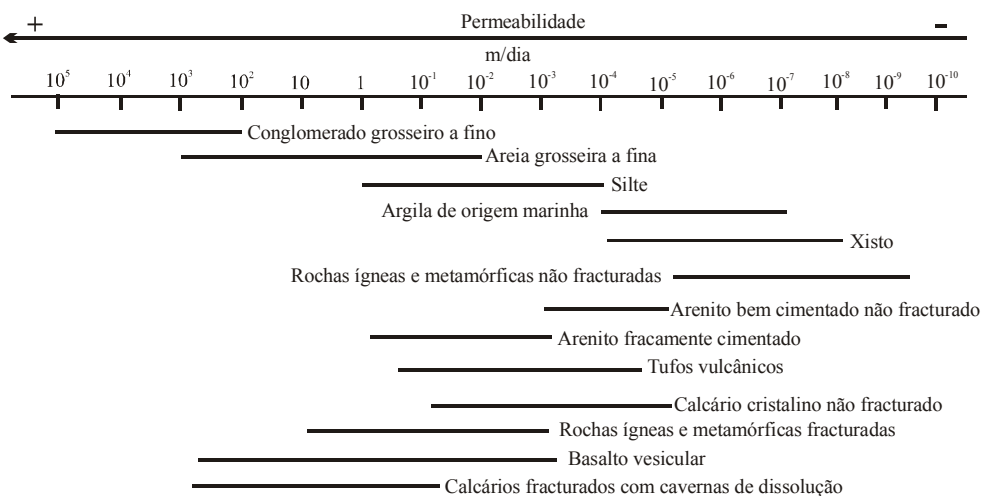
**Figura 3.10** – Representação esquemática de diferentes tipos de rocha, com distintas porosidades.

De modo geral, a porosidade primária é maior nos sedimentos detríticos não consolidados e rochas detríticas consolidadas e inferior em rochas cristalinas, ígneas ou metamórficas, não meteorizadas e pouco fracturadas.

### 3.4.2.2 Permeabilidade ou condutividade hidráulica

A permeabilidade é a propriedade que quantifica a facilidade com que um fluido percola no interior do maciço rochoso sem destruição da estrutura da

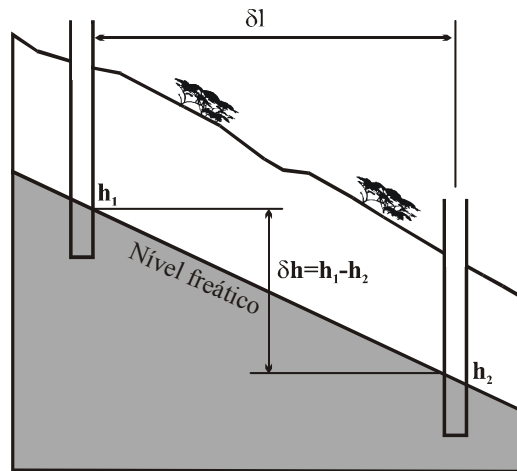
rocha. Uma rocha diz-se permeável se permite circulação de um caudal fluido apreciável e impermeável se a taxa de percolação (e o caudal associado) for negligenciável. Os factores que determinam a permeabilidade de uma rocha são intrínsecos e extrínsecos. Dos factores intrínsecos o mais importante é a dimensão dos poros. Dois aquíferos formados por partículas esféricas de 0,1m e  $10^{-3}$ m de raio, têm porosidades iguais mas diferentes permeabilidades: se os restantes parâmetros condicionantes forem semelhantes, o meio formado pelas partículas maiores será mais permeável (Fig. 3.11). Efectivamente, a dimensão dos grãos afecta a sua superfície e, indirectamente, a quantidade de água aderente por efeito da tensão superficial. Um sedimento detrítico grosseiro apresenta poros com diâmetros grandes relativamente à espessura combinada dos filmes de água aderentes a cada um dos grãos confinantes; na região central dos poros a água tem possibilidade de circulação e o sedimento é permeável. Em contraste, um sedimento detrítico fino (argilas, por exemplo), cujas partículas têm diâmetros inferiores a 0,005mm, apresentam porosidade elevada mas permeabilidade muito baixa porque os poros são muito pequenos; nestas condições, os filmes de água que aderem à superfície das partículas contactam uns com os outros, e esta água fica firmemente “presa” no interior da rocha. Os factores extrínsecos são os que dependem da natureza do fluido circulante (fundamentalmente a viscosidade e o peso específico). A permeabilidade de um aquífero é geralmente superior a  $10^{-5}$ m/s enquanto um aquícludo terá uma permeabilidade inferior a  $10^{-9}$ m/s.



**Figura 3.11** – Valores típicos de permeabilidade das rochas mais comuns.

Em 1856, o engenheiro francês Henri Darcy estabeleceu a relação existente entre os factores que controlam a descarga de um aquífero (caudal por unidade de área): a permeabilidade (K) e o declive ou gradiente hidráulico (i) do aquífero ( $\partial h/\partial l$ ) (Fig. 3.12), em condições de escoamento laminar:

$$v = K \frac{\partial h}{\partial l}$$



**Figura 3.12** – Representação gráfica dos parâmetros de um aquífero que interferem na Lei de Darcy.

Esta é a designada Lei de Darcy, que pode ser modificada para incluir a porosidade ( $\eta$ ):

$$v = \frac{K}{\eta} \frac{\partial h}{\partial l}$$

Esta equação pode ser usada para estimar quanto tempo a água ou um poluente demora a efectuar um determinado percurso subterrâneo ou para avaliar as potencialidades de um determinado volume de rocha como aquífero.

### Actividade 3.1

Assuma que uma substância química (a qual percola à mesma velocidade que a água subterrânea) é introduzida num aquífero devido a uma fractura num tanque de armazenamento subterrâneo. Se o aquífero tiver uma permeabilidade de 60m/dia, uma porosidade de 30% e um gradiente hidráulico de 1m/1000m, qual a velocidade a que a substância se desloca?

Resultado: 0,2m/dia ou 73m/ano.

Se a fractura ocorrer numa argila com uma permeabilidade de  $1,4 \times 10^{-4}$  m/dia, uma porosidade de 20% e um gradiente hidráulico de 1m/10m, a substância química viajará muito mais devagar:  $5 \times 10^{-5}$  m/dia ou 0,02m/ano. O fluxo é, pois, mais rápido, ou seja, a condutividade hidráulica é mais elevada nas rochas com maior permeabilidade e em áreas de maior declive.

Chama-se produção específica à razão (expressa em percentagem) entre o volume de água subterrânea que pode ser drenado por gravidade de uma rocha porosa e o seu volume total. A produção específica é sempre inferior à porosidade (Tabela 3.7) na medida em que não é possível extrair a totalidade da água de um reservatório subterrâneo, devido aos efeitos de adesão superficial.

**Tabela 3.7** – Valores típicos de porosidade e produção específica de algumas rochas.

Rocha	Porosidade (%)	Produção específica (%)	Rocha	Porosidade (%)	Produção específica (%)
Conglomerado grosseiro	24-26	23	Arenito	5-30	21-27
Conglomerado fino	25-38	25	Siltito	21-41	15-25
Areia grosseira	31-46	27	Argilito	0-10	0-3
Areia fina	26-53	23	Calcário	0-50	5-45
Silte	34-61	8	Basalto	3-35	8
Argila	34-60	3	Granito alterado	34-57	40-45
Xistos fracturados	30-38	26	Gabro alterado	42-45	35-40
Rochas cristalinas	0-5	0,1			
Rochas cristalinas fracturadas	0-10	5			

À razão (expressa em percentagem) entre a quantidade de água subterrânea retida por tensão superficial e o volume total do aquífero chama-se retenção específica. A soma da produção e retenção específicas iguala a porosidade da rocha, se todos os poros estiverem efectivamente interligados. Quanto maior for o valor da retenção específica, maior será a dificuldade de remoção de contaminantes da água subterrânea por lavagem (“flushing”) ou bombeamento do volume contaminado.

### 3.4.3 Fontes de água subterrânea

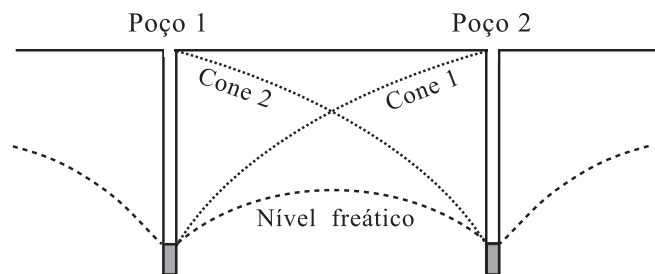
As principais fontes de água subterrânea são as nascentes e os poços.

### 3.4.3.1 Nascentes

Nascentes são locais onde a água subterrânea emerge naturalmente na superfície topográfica, visto que, nesses locais, esta intercepta a superfície freática. Existem nascentes pequenas em todos os tipos de rochas, associadas à presença de discontinuidades (falhas, diaclases) mas quase todas as grandes nascentes são encontradas em calcários, cascalheiras ou rochas vulcânicas. Um oásis é um tipo particular de nascente; trata-se de uma depressão na superfície do deserto de areia originada por deflacção eólica, que descobre a superfície freática, permitindo o afloramento localizado de um espelho de água e o crescimento de vegetação nas margens. Em climas húmidos, o equivalente funcional de um oásis é um pântano, embora os seus mecanismos genéticos sejam diferentes.

### 3.4.3.2 Poços

Um poço é uma perfuração vertical, geralmente de pequeno diâmetro, que intercepta a superfície freática e penetra no aquífero acumulando água no seu interior. Quando a água do poço é bombeada a uma taxa superior à taxa de fluxo local, induz uma descida rápida da superfície freática, localizada nas vizinhanças próximas da captação, com geometria cónica, designada por cone de depressão (Fig. 3.13). Quando o bombeamento cessa, aquele cone é preenchido naturalmente e o nível original de água da superfície freática é gradualmente restabelecido.



**Figura 3.13** – Representação esquemática do nível freático nas vizinhanças de poços.

A produção de um poço varia com as características do aquífero. Se a rocha reservatório não for homogênea em termos dos parâmetros condicionantes da porosidade e da permeabilidade, o caudal fornecido por poços localizados a curta distância pode variar consideravelmente. Por exemplo, um poço que atravesse rochas ígneas ou metamórficas onde estas se encontrem fracturadas pode fornecer água em abundância, enquanto outro, instalado nas mesmas rochas não fracturadas pode ser improdutivo. Corpos ou intercalações

descontínuas de rochas impermeáveis no seio de um aquífero podem também induzir diferentes produções em poços que exploram a mesma unidade geológica. Uma camada lenticular impermeável, instalada na zona de aeração pode originar um pequeno aquífero suspenso, localizado acima do aquífero principal. Um poço que capte esta unidade pode produzir água enquanto outro, adjacente e colocado à mesma profundidade, pode ser improdutivo.

### 3.5 Impactes devidos à exploração de água superficial

A exploração da água superficial dos rios ou lagos envolve a sua extracção directa, efectuada através de canais de desvio (valas) ou por bombeamento. Os impactes desta exploração dependem dos caudais explorados e do tempo de exploração e podem incluir:

- acréscimo da sedimentação e conseqüente redução da secção do canal de escoamento do rio devida à redução da capacidade natural de transporte sólido resultante da diminuição de caudais;
- desenvolvimento de vegetação no interior do leito de escoamento do rio;
- modificação da ecologia ribeirinha;
- aumento da concentração de poluentes devido ao decréscimo da sua taxa de diluição;
- diminuição das potencialidades oferecidas para navegação, pesca e outras actividades relacionadas com o ambiente aquático.

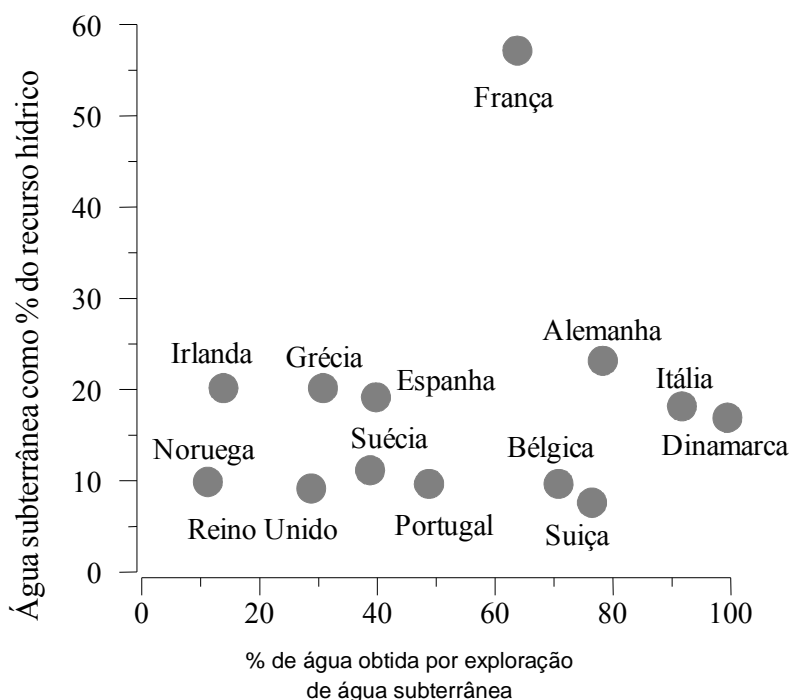
A satisfação das necessidades de consumo das populações a partir dos reservatórios superficiais implica o armazenamento temporário de volumes consideráveis de água em albufeiras, limitadas por barragens e sua distribuição posterior. Estas estruturas, têm, no entanto, alguns impactes ambientais, que incluem:

- a acumulação de sedimentos nas albufeiras (devido à barreira física imposta pela barragem ao escoamento natural). Os reservatórios podem colmatar (ocasionalmente ao fim de algumas décadas), se os materiais detríticos acumulados não forem removidos por meios artificiais;
- erosão a jusante – incremento da taxa de erosão natural do canal fluvial a jusante da barragem durante os períodos de descarga<sup>10</sup>;
- risco de rotura da barragem;
- perca e salinização da água – devido à evaporação da água da albufeira;
- perturbações biológicas – impedimento da migração dos peixes, perda de habitats aquáticos (a jusante) e terrestres (a montante).

<sup>10</sup> Ao escoamento superficial corresponde uma certa quantidade de energia que é utilizada para transportar sedimento e vencer a resistência induzida pelo atrito com o fundo e com as margens. Visto que grande parte da carga sedimentar proveniente de montante é depositada no reservatório, as descargas para jusante da barragem dispõem de um diferencial positivo de energia e consomem-no através da erosão, até que a sua capacidade de transporte sólido potencial seja novamente saturada. Por outro lado, se este efeito sobre-escava e aprofunda o talvegue principal, a erosão dos tributários aumenta porque o seu nível de base local baixou; este efeito causa, por vezes, acréscimo dos problemas de perca de solo em terrenos agrícolas localizados a jusante da barragem.

### 3.6 Impactes devidos à exploração de água subterrânea

A água subterrânea é geralmente de qualidade superior, requer menos tratamentos e por estas razões é mais económica que a água superficial. A figura 3.14 ilustra as relações existentes entre a importância da água subterrânea relativamente aos recursos hídricos totais em diferentes países da Europa e a percentagem de água consumida em cada um desses países a partir de reservatórios subterrâneos. Alguns países, como a Áustria, a Suíça, a Itália e a Dinamarca, exploram quase integralmente os seus recursos subterrâneos (embora estes representem cerca de 1/5 dos recursos hídricos disponíveis), enquanto outros, como a França, dispõem de importantes recursos hídricos subterrâneos, subexplorados. A Islândia tem igualmente grandes reservas de água subterrânea a qual constitui 91% da água utilizada neste país. Na Noruega, Espanha, Suécia e Inglaterra, menos de 50% do abastecimento público é feito a partir da água subterrânea. Em Portugal, a água subterrânea constituiu nos anos 70 cerca de 70% dos consumos, mas actualmente perfaz apenas 50%, e é especialmente utilizada para abastecimento de povoações de pequena e média dimensão.



**Figura 3.14** – Exploração da água subterrânea em diversos países europeus.

Quando a taxa de exploração de água subterrânea excede a taxa de recarga natural, o volume de água armazenada nos aquíferos diminui. Em muitas

---

regiões do mundo a recarga natural é extremamente lenta e podem ser necessários séculos ou milénios para que os aquíferos recuperem a situação inicial. As consequências da exploração excessiva e consequente rebaixamento da superfície freática incluem a depleção do reservatório subterrâneo, a compactação e subsidência e a intrusão salina.

### 3.6.1 *Depleção do reservatório subterrâneo*

A maioria dos poços utilizados para uso doméstico origina um cone de depressão relativamente pequeno. No entanto, nos poços bombeados para irrigação ou uso industrial, a taxa de exploração é muito superior e os cones de depressão associados alastram, rebaixando o nível freático nas captações vizinhas. Quando esta situação afecta captações pouco espaçadas, os cones de depressão sobrepõem-se, podendo originar um rebaixamento do nível freático com expressão regional. Em consequência, os poços menos profundos podem secar à medida que o cone de depressão se aprofunda e alastra, obrigando ao seu reaprofundamento e a um aumento dos custos de bombeamento. A descida da superfície freática pode conduzir igualmente à secagem de nascentes e mesmo de alguns rios, particularmente dos que têm características influentes.

O desenvolvimento urbano origina depleção dos reservatórios subterrâneos não apenas por aumento da procura de água mas também pela expansão de coberturas impermeáveis (estradas, parqueamentos, edifícios e passeios) que podem cobrir e inutilizar no todo ou em parte as áreas de recarga.

### 3.6.2 *Compactação e subsidência*

A água contida nos poros de um aquífero contribui para suportar a pressão correspondente ao peso das rochas suprajacentes. Sempre que a recarga natural do aquífero não compense o caudal de água subterrânea explorada, há uma transferência gradual das tensões do fluido intersticial para a estrutura granular, que se pode deformar e reajustar a sua textura às novas condições de pressão através de um efeito de compactação (ou, neste caso, hidrocompactação). Quando um aquífero compacta, a sua porosidade diminui, reduzindo-se de forma irreversível a produção específica e, frequentemente, a permeabilidade. Outro resultado da compactação é a subsidência da superfície topográfica. A magnitude da subsidência resultante da sobreexploração de água subterrânea depende da taxa e intensidade do rebaixamento da superfície freática e da espessura e compressibilidade do aquífero. Em rochas cristalinas (ígneas e metamórficas) o tempo necessário ao reajuste volumétrico é da ordem das décadas ou anos

mas materiais altamente compressíveis como argilas, sedimentos orgânicos (turfas) ou sedimentos granulares grosseiros, ajustam-se rapidamente. A subsidência é muito comum em aquíferos compostos por materiais não consolidados confinados por níveis menos permeáveis, nomeadamente argilosos. À medida que a água é bombeada do aquífero, os níveis menos permeáveis drenam para o interior daquele e simultaneamente contraem e colapsam. Em regiões de cota elevada ou interiores, a subsidência causa frequentemente problemas estruturais como a rotura das fundações de edifícios. Um exemplo bem conhecido é o da cidade do México, uma das maiores do Mundo. Foi construída sobre um antigo lago colmatado, ocupando a caldeira de um vulcão extinto e a sobreexploração de água subterrânea originou subsidência intensa e rápida da superfície, que atingiu cerca de 8,5m, de tal modo que em muitos edifícios se entra hoje pelo 2º andar. Também a sobreexploração dos aquíferos carbonatados da Bacia de Londres levou a um rebaixamento da superfície freática da ordem de 125m, causando subsidência generalizada. Em regiões localizadas a cotas próximas do nível médio do mar, a subsidência pode conduzir a inundações extensas, bem como aumentar as taxas de erosão costeira. A cidade de Veneza (Itália) é um exemplo típico de inundação lenta mas inexorável, pelos efeitos combinados da elevação gradual do nível do mar, da subsidência tectónica da costa Adriática e da subsidência superficial devido à sobreexploração de água subterrânea<sup>11</sup>. Em casos particulares, é tecnicamente possível (mas sempre muito oneroso) diminuir, anular ou mesmo inverter o processo de subsidência, efectuando recarga artificial ou repressurização do aquífero (através de poços de injeção em aquíferos confinados ou bacias de recarga em aquíferos não confinados) a fim de aumentar a pressão dos fluidos intersticiais. No entanto, estes processos, têm uma taxa de sucesso muito variável e frequentemente não são eficazes.

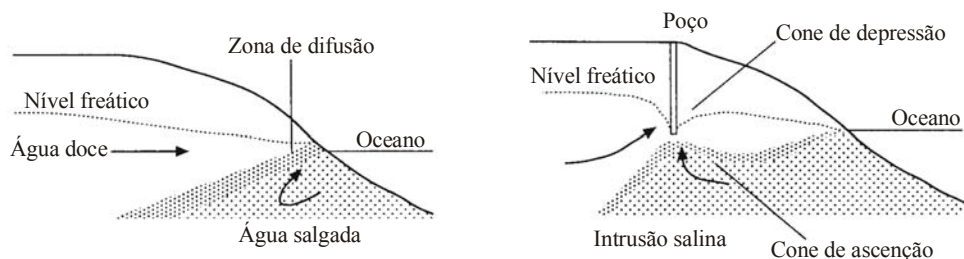
<sup>11</sup> Esta actividade cessou em 1969 mas os seus efeitos perduram ainda hoje.

### 3.6.3 *Intrusão salina*

Em ilhas e zonas costeiras, o rebaixamento da superfície freática e a depleção da zona saturada podem conduzir a um tipo de contaminação da água subterrânea designado “intrusão salina”, que pode tornar as captações improdutivas.

No interior do aquífero costeiro, a água doce proveniente do continente está separada da água do mar que penetra o aquífero por uma delgada zona de transição de água salobra (Fig. 3.15). A água doce, menos densa, acumula-se sob a forma de uma lente, que flutua sobre a cunha de água salgada, mais densa. Se a exploração de água subterrânea for compensada pela recarga natural, a espessura da lente de água doce e a posição da interface permanecem invariantes. Contudo, se o consumo de água doce for mais rápido do que a taxa de reposição natural, o volume da lente de água doce diminui, reduz-se o

caudal efluente no oceano e favorece-se a penetração da cunha de água salgada para o interior do aquífero, contaminando as captações costeiras. Os níveis de cloreto podem, por esta razão aumentar de concentrações normais (cerca de 25mg/l) para valores próximos de 19000mg/l (concentração típica na água do mar); note-se que o limite máximo recomendado na Europa para água de consumo é de 200mg/l. Em Portugal, as regiões do Algarve, Madeira e Porto Santo, são as que apresentam os mais graves problemas de salinização das águas subterrâneas.



**Figura 3.15** – Contaminação da água subterrânea por intrusão salina.

Uma vez instalada, a intrusão salina não é fácil de controlar, devido às reduzidas taxas naturais de fluxo subterrâneo e à diferença de densidade entre água salgada e doce, pelo que a correcção desta situação é morosa em condições naturais. Embora de reversão difícil, a intrusão salina pode ser prevenida através de recarga artificial ou da construção de barreiras de extracção, soluções sempre muito dispendiosas. A recarga artificial envolve a injeção controlada de água no aquífero através de poços, o que implica um fornecimento adicional de água doce. Uma barreira de extracção consiste na instalação de uma linha de captações paralela à costa, colocada a jusante da interface água salgada/água doce, de onde se extrai continuamente água salgada, impedindo a cunha salina de atingir os poços de abastecimento.

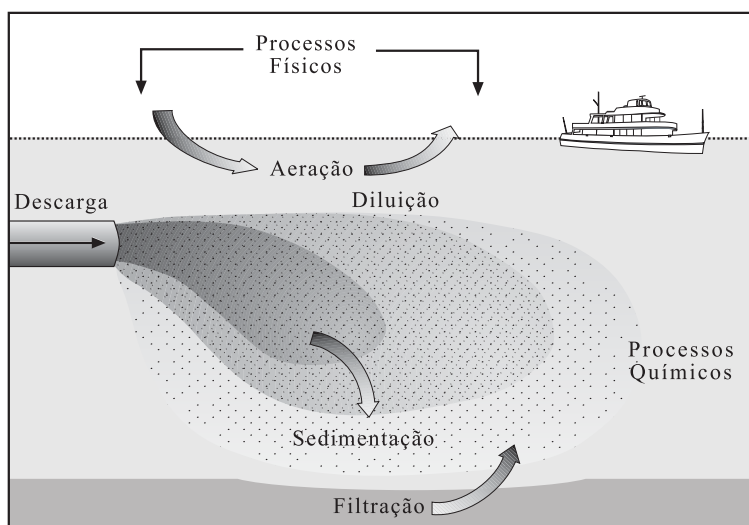
### 3.7 Qualidade da água

Na avaliação de recursos hídricos, o critério da qualidade da água é tão importante como o da quantidade. A qualificação da água varia de acordo com o uso – doméstico, industrial, agrícola ou recreio, existindo também diferentes normas reguladoras da qualidade. A qualidade da água é habitualmente determinada por cientistas ou técnicos, em laboratórios acreditados, por meio de amostragem em poços (água subterrânea) ou água superficial. Algumas características como a temperatura, a turbidez, o oxigénio dissolvido, a alcalinidade e o pH são medidos *in situ* com instrumentos portáteis de leitura directa. No laboratório outros aparelhos e métodos (cromatografia

gasosa, espectrometria de massa e espectrometria de emissão de plasma) são usados para detectar e quantificar a concentração de uma grande variedade de constituintes. Muitas substâncias podem destruir a qualidade da água se presentes em diminutas quantidades e, nestes casos, recorre-se a equipamento sofisticado para detectar concentrações muito baixas destas substâncias. Por exemplo, 1g de 2.4D (um herbicida comum) é suficiente para tornar impróprio para consumo um volume de 10 milhões de litros de água e 1g de PCB pode tornar 1000 milhões de litros de água imprópria para a vida aquática.

### 3.7.1 *Influências naturais*

De modo geral, e na ausência de intervenção humana, a água superficial e subterrânea é razoavelmente límpida, tem poucos minerais dissolvidos e normalmente é potável. A água pode ser purificada naturalmente através de vários processos, físicos e químicos (Fig. 3.16). Os processos físicos são importantes na remoção de partículas de maiores dimensões transportadas em suspensão ou por arraste e incluem a diluição, a sedimentação natural da carga sólida em suspensão, a filtração (por percolação através do meio poroso) e a aeração (libertação de substâncias gasosas para a atmosfera). Por outro lado, as águas naturais contêm substâncias minerais e gases dissolvidos que interagem quimicamente de modo complexo. A maior parte das reacções são bioquímicas, envolvendo enzimas e outros químicos produzidos por organismos, mas também podem ocorrer reacções químicas de origem inorgânica. Muitos elementos tais como o ferro ou o fósforo podem reagir para formar moléculas insolúveis que sedimentam, diminuindo a carga mineral dissolvida.



**Figura 3.16** – Processos naturais de purificação da água.

---

Contudo, existem diversos processos naturais que podem influenciar negativamente a qualidade da água. Esta, varia também com o clima, a estação do ano e a natureza geológica do substrato local. Os sais dissolvidos nas águas naturais são essencialmente cloretos, sulfatos e bicarbonatos de Ca, Mg, Na, K e Fe. Em substrato calcário, a água é especialmente rica em bicarbonatos de Ca e Mg, de origem local. É uma água dura, que dissolve dificilmente o sabão, e gera incrustações calcárias frequentes nas condutas e tubagens. Em contraste, as águas que contêm poucos sais dissolvidos e pouco Ca são chamadas águas moles; encontram-se normalmente em regiões vulcânicas e em substratos areníticos. A água subterrânea flui lentamente e permanece em contacto com as rochas durante períodos longos, podendo dissolver elementos que tornam a água imprópria para consumo: a circulação através de rochas ricas em enxofre pode conduzir à dissolução de um excesso de ácido sulfídrico ( $H_2S$ ), o qual, embora inofensivo, tem um cheiro desagradável; o ferro dissolvido pode afectar o sabor e a cor da água; elementos tóxicos como o mercúrio, o arsénio, o flúor e o urânio podem também ocorrer naturalmente quer na água superficial quer subterrânea, libertados gradualmente das rochas do substrato ou precipitados a partir da atmosfera.

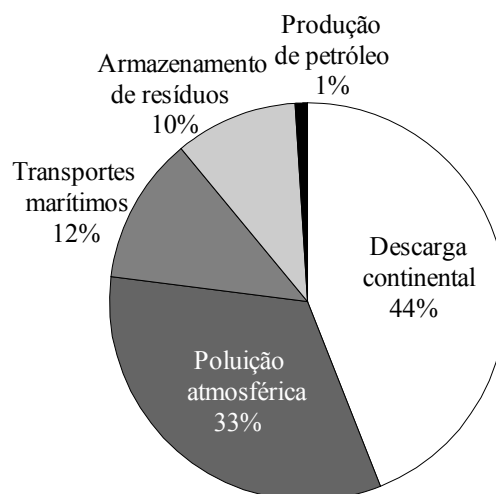
### 3.7.2 *Fontes poluidoras pontuais e não pontuais*

As substâncias contaminantes da água são libertadas de um grande número de fontes, pontuais e não pontuais. As fontes pontuais são bem localizadas e podem ser representadas por um simples ponto num mapa; delas são exemplos os tubos de esgoto municipais ou industriais, o derrame de uma substância de um depósito, navio ou unidade de transformação, uma exploração mineira, matadouros, operações de sondagem, etc. As fontes não pontuais são as que ocupam superfícies extensas. Um exemplo de uma fonte não pontual é o escoamento de químicos usados na agricultura, as redes de drenagem de efluentes produzidos em áreas urbanizadas de grande dimensão ou de áreas suburbanas. As massas de ar em movimento podem também constituir fontes poluentes significativas, não pontuais; efectivamente, mesmo que a substância contaminante seja originalmente libertada de um único emissor (por exemplo chaminé, fonte pontual) as hipóteses de dispersão posterior através da circulação atmosférica são grandes, podendo eventualmente afectar vastas áreas (fonte não pontual). É bastante mais fácil controlar fontes de poluição pontuais pois são circunscritas e, como tal, podem ser identificadas, testadas e monitorizadas. As fontes não pontuais podem originar-se a partir de diversas fontes individuais, contribuindo cada uma com uma pequena fracção de contaminante para um conjunto que, afectando uma área vasta, pode originar um problema de poluição grave e potencialmente incontrollável.

<sup>12</sup> Para complemento deste sub-capítulo aconselha-se a leitura do volume n.º 170, *Poluição das Águas*.

### 3.7.3 Poluição da água superficial<sup>12</sup>

O aumento populacional e da qualidade de vida, conduz a um aumento do consumo de água per capita. Em consequência, também a quantidade de resíduos lançados na água cresceu exponencialmente, conduzindo a um aumento dos níveis de poluição. Os contaminantes da água superficial provêm essencialmente dos efluentes domésticos (urbanos e suburbanos), da actividade agrícola e dos efluentes industriais (incluindo as extracções mineiras), fontes poluidoras que tendem a concentrar-se ao longo das margens dos rios e dos lagos. Os lagos (águas estáticas ou lânticas) são mais facilmente poluídos que os rios (águas correntes ou lóaticas): a circulação é muito mais lenta (as camadas de água mais profundas apenas são mobilizadas por variação térmica sazonal), ocupam habitualmente posição terminal de bacias endorreicas colectando água (e acumulando poluentes) e armazenam menor volume de água que os rios. A poluição das águas costeiras é importante por razões ecológicas e económicas. Os litorais marinhos contêm alguns dos ecossistemas mais produtivos da biosfera; efectivamente, as lagunas e estuários são maternidade de um vasto número de organismos que, em estados larvar e juvenil, têm sensibilidade extrema à poluição. As consequências económicas são significativas, visto que mais de 99% da pesca é efectuada a menos de 200 milhas (360km) da costa e um importante condicionante do declínio mundial da indústria pesqueira à escala mundial é atribuível à perda dos habitats costeiros. A figura 3.17 esquematiza as principais fontes de poluição das águas costeiras, das quais se destacam as descargas com origem continental (44%) e a poluição atmosférica (33%).



**Figura 3.17** – Principais fontes poluidoras das águas oceânicas.

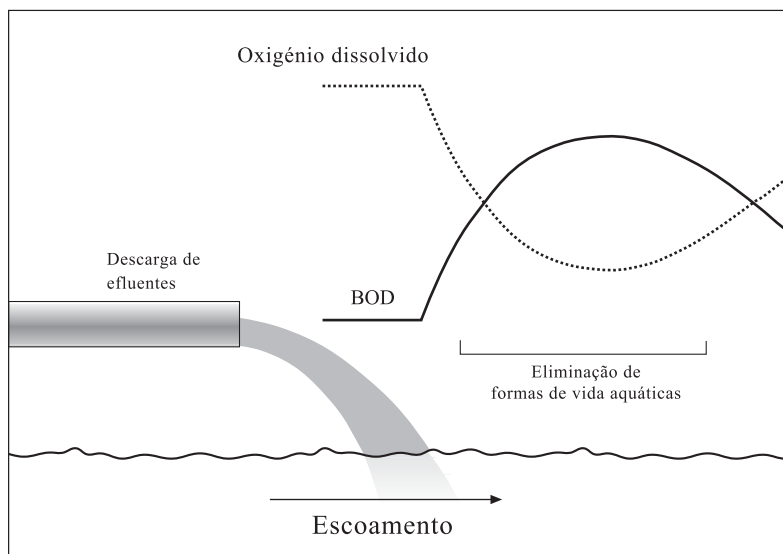
O Serviço de Saúde Pública Americano classifica os poluentes da água em oito categorias principais, que se descrevem de modo breve seguidamente.

### 3.7.3.1 Efluentes com carência bioquímica de oxigénio

Os efluentes com carência bioquímica de oxigénio contêm grandes quantidades de matéria orgânica. Os compostos orgânicos, geralmente instáveis, são naturalmente degradados por via biológica ou química, resultando dessa transformação produtos mais estáveis como o  $\text{CO}_2$ , o  $\text{NO}_3$  ou  $\text{H}_2\text{O}$  e um grande consumo de oxigénio. Dos efluentes que induzem o consumo de oxigénio dissolvido no corpo aquoso para degradação dos contaminantes orgânicos, diz-se terem carência bioquímica de oxigénio<sup>13</sup> (BOD – biochemical oxygen demand) ou carência química de oxigénio (COD – chemical oxygen demand). BOD é a quantidade de oxigénio necessária para degradação da matéria orgânica por microorganismos aeróbios e COD é a quantidade de oxigénio gasta na oxidação da matéria orgânica por via química<sup>14</sup>. Quanto maior for a quantidade de matéria orgânica descarregada por unidade de tempo, maior o BOD ou COD do efluente. A figura 3.18 mostra o aumento do BOD e a correspondente diminuição do teor de oxigénio dissolvido, tipicamente observados imediatamente a jusante de uma fonte de efluentes orgânicos. A presença de oxigénio dissolvido na água, é uma condição essencial para a manutenção da maioria das formas de vida aquáticas e quando a sua concentração desce abaixo de níveis críticos, aquelas podem sofrer danos importantes ou mesmo desaparecer (Fig. 3.18).

<sup>13</sup> Outros tipos de biodegradação, geralmente mais lentos, podem ocorrer em ambiente anaeróbio, e são levados a cabo por organismos que não necessitam de oxigénio.

<sup>14</sup> Em rios não poluídos, os valores típicos de BOD e COD são respectivamente <2mg/l e 20mg/l.



**Figura 3.18** – Curvas de variação de oxigénio dissolvido na água dos rios e BOD a jusante de um ponto de descarga de efluentes.

As principais fontes deste tipo de poluentes são os efluentes domésticos, as indústrias cervejeira, de destilação e de fabrico de papel, bem como a actividade

<sup>15</sup> BOD<sub>5</sub> é a carência bioquímica do efluente ao fim de 5 dias.

agrícola, a que se adicionam o processamento e congelação de alimentos e as fábricas de açúcar. A legislação portuguesa estabelece o valor máximo admissível de BOD<sub>5</sub> <40mg/l<sup>15</sup> para a descarga de águas residuais nos sistemas aquáticos naturais.

### 3.7.3.2 Nutrientes

Os nutrientes são, como referido no capítulo anterior, elementos necessários ao metabolismo e crescimento das plantas. Na medida em que a velocidade de qualquer processo ecológico é controlada pelo factor essencial ao metabolismo menos abundante, a produtividade primária (em condições ambientais idênticas quanto a luz, temperatura, oxigénio dissolvido, etc.) é limitada pelo nutriente mais escasso (nutriente limitante). Em sistemas naturais dulciaquícolas o nutriente limitante é normalmente o fósforo<sup>16</sup> (na forma de ortofosfato iónico – PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>) enquanto em ambientes marinhos é o azoto (sob a forma de amónia – NH<sub>4</sub> – e nitratos – NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)<sup>17</sup>. Quando um sistema aquático contém uma concentração elevada de nutrientes, a produtividade primária aumenta, ou seja, o crescimento e multiplicação das plantas (como as algas por exemplo) faz-se sem controle (bloom de algas), conduzindo à eutrofização, um processo que ocorre naturalmente durante o ciclo de vida dos sistemas aquáticos. O fósforo tem origem na erosão das rochas (principalmente das rochas ricas em apatite)<sup>18</sup>, na deposição de poeiras, em gases vulcânicos e nos aerossóis marinhos; o azoto tem origem essencialmente atmosférica. Os problemas surgem, contudo, quando a eutrofização natural é tremendamente acelerada pela adição de excesso de nutrientes, oriundos de fontes antropogénicas, um processo designado por eutrofização cultural. A fertilização de solos agrícolas e a descarga de efluentes não tratados (contendo detergentes ricos em fosfatos, por exemplo), são as principais fontes antropogénicas de fósforo e azoto.

Em ambientes eutróficos, a actividade dos herbívoros é insuficiente para controlar totalmente a explosão dos produtores primários, pelo que as plantas acabam por morrer e entrar em decomposição. Por sua vez, a decomposição liberta mais nutrientes para o meio aquático e consome grande parte do oxigénio dissolvido na água, conduzindo ao desaparecimento dos organismos incapazes de sobreviver em meios com baixas concentrações de O<sub>2</sub> e reduzindo, pois, a diversidade.

Algumas espécies típicas de sistemas eutróficos como as cianobactérias, indicam, pela sua presença, fraca qualidade da água. As toxinas produzidas por estes organismos afectam animais e seres humanos, podendo mesmo ser letais. A ingestão de águas contaminadas com nitrato<sup>19</sup> pode conduzir à redução da capacidade de transporte de oxigénio na corrente sanguínea, prejudicando

<sup>16</sup> Em rios não poluídos, a concentração de fósforo total é inferior a 25mg/l. Assume-se que concentrações superiores a 50mg/l resultam da actividade antrópica.

<sup>17</sup> O azoto pode igualmente ser um nutriente limitante em ambientes de água doce.

<sup>18</sup> A apatite é um mineral frequente como acessório das rochas ígneas, sedimentares e metamórficas. No entanto, existem rochas em que a percentagem deste mineral é muito elevada, como em alguns calcários e nos fosforitos, onde atinge 50% da composição mineralógica total.

<sup>19</sup> O nitrato em si não é tóxico, mas sim o nitrito. A redução de nitrato para nitrito ocorre por acção bacteriana na saliva durante a mastigação ou outros componentes do aparelho digestivo, incluindo o estômago.

a saúde dos seres humanos. Nas crianças com idade inferior a 1 ano o risco de contrair metahemoglobinemia<sup>20</sup> (geralmente conhecida pela doença do “bebé azul”) é superior<sup>21</sup>. Por outro lado, existe a possibilidade de reacção dos nitratos com aminas e amidas (derivados dos alimentos), através da actividade bacteriana no aparelho digestivo, resultando na formação de nitrosaminas e nitrosamidas, substâncias potencialmente carcinogénicas.

A concentração de azoto na água de rios não poluídos é inferior a 0,5mg/l e este valor é excedido na grande maioria dos rios europeus. As concentrações mais elevadas encontram-se no Norte da Europa Ocidental e na Europa de Leste, reflectindo práticas de agricultura intensiva. A diferença entre o total de amónia que entra nos sistemas agrícolas por unidade de tempo (a partir de fertilizantes comerciais e da deposição atmosférica, por exemplo) e o total que o abandona no mesmo período (colheitas) é uma medida do potencial de lixiviação do azoto para os cursos de água. Um estudo efectuado em terrenos agrícolas da União Europeia mostra que a diferença entre as entradas e as saídas é sistematicamente positiva, variando entre 200kg/ha/ano na Holanda e menos de 10kg/ha/ano em Portugal.

A análise de cerca de 1000 amostras de água colhidas em rios europeus mostra que apenas 10% têm concentração de fósforo inferior a 50mg/l. As concentrações mais baixas encontram-se nos países nórdicos, reflectindo solos e substratos rochosos pobres em nutrientes, baixa densidade populacional e precipitação elevada. As concentrações de fósforo mais elevadas ocorrem numa faixa que se estende desde o sul de Inglaterra, ao longo da Europa Central, até à Roménia e Ucrânia. Os rios da Europa do Sul apresentam concentrações de P mais baixas do que os da Europa de Leste, o que se pode dever ao facto de os países do Sul efectuarem descarga directa de resíduos no mar. De modo geral, tem-se assistido na última década, a um decréscimo significativo das concentrações de fósforo na água dos rios europeus, devido à generalização dos tratamentos de resíduos sólidos e à redução do teor em fósforo nos detergentes domésticos.

### 3.7.3.3 Agentes infecciosos

A introdução de agentes patogénicos a partir de efluentes orgânicos é outra forma de contaminação da água. Bactérias, vírus, protozoários e vermes parasitas, são exemplos de organismos causadores de doenças com origem em excrementos de animais (incluindo humanos). A abundância de microorganismos infecciosos na água é normalmente avaliada a partir da concentração de uma bactéria coliforme fecal – *Escherichia coli*<sup>22</sup> – que vive no intestino dos seres humanos e de outros animais. Os vírus são mais críticos

<sup>20</sup> A metahemoglobinemia é resultante da reacção do nitrito com a hemoglobina do sangue, promovendo a oxidação do ferro ferroso para ferro férrico, gerando-se metahemoglobina.

<sup>21</sup> As crianças com menos de 6 meses de idade apresentam um fluido gástrico com pH elevado, o que favorece a proliferação de bactérias redutoras. Além disso, ingerem doses elevadas de água ou alimentos relativamente ao seu peso.

<sup>22</sup> Normalmente, utiliza-se como indicador de contaminação patogénica as bactérias coliformes visto que estas e, em especial a *Escherichia coli*, são fáceis de reconhecer. Se esta bactéria estiver presente, é possível que outras bactérias patogénicas, mais difíceis de detectar, também existam; pelo contrário, a ausência de *Escherichia coli* é geralmente considerada indicador de contaminação negligenciável por agentes patogénicos.

que as bactérias pois tendem a sobreviver mais tempo e são mais resistentes aos desinfetantes. Em muitas partes do mundo, onde as condições sanitárias sejam deficientes, o consumo de água contaminada com agentes patogênicos desencadeia surtos de cólera, difteria e febre tifóide entre outros.

### 3.7.3.4 Substâncias químicas orgânicas

Algumas substâncias químicas orgânicas embora naturais, tais como o petróleo ou o carvão podem ser tóxicas<sup>23</sup> para muitas espécies (ver Capítulo 4). Mas muitos outros químicos orgânicos são sintetizados pelo Homem, devido às propriedades únicas das ligações químicas do carbono. Entre os poluentes orgânicos mais comuns contam-se os pesticidas orgânicos, que incluem o DDT, um hidrocarboneto clorado de elevada persistência ambiental. Outro grupo de poluentes orgânicos altamente tóxicos é o dos PCBs (bifenilpoliclorados). Os PCBs são hidrocarbonetos clorados muito utilizados na indústria de tintas e vernizes, plásticos, adesivos, lacas, lacres e lubrificantes, bem como no fabrico de isolantes eléctricos, fluidos hidráulicos e fluidos transmissores de calor. Devido à sua semelhança química, o grau de toxicidade dos PCBs iguala o dos pesticidas organoclorados. Exibem uma persistência e dispersão ambiental elevadas e uma grande afinidade para os tecidos lipídicos dos organismos. Para o Homem, são o terceiro composto em grau de toxicidade (só ultrapassado pelas dioxinas e pelos furanos), e são ingeridos essencialmente através do consumo de peixe contaminado.

Outros hidrocarbonetos, tais como o benzeno (proveniente de efluentes industriais bem como da combustão incompleta de gasóleo nas incineradoras e veículos e ainda do tabaco) e os PAHs (hidrocarbonetos policíclicos aromáticos que provém da combustão incompleta da gasolina, madeira e carvão), são também altamente tóxicos.

### 3.7.3.5 Substâncias químicas inorgânicas

Os poluentes mais nocivos deste grupo são os metais pesados, os ácidos e as bases.

#### *Metais pesados*

Os metais pesados, incluindo o cádmio (Cd), o chumbo (Pb), o níquel (Ni), o estanho (Sn), o zinco (Zn), o crómio (Cr) e o mercúrio (Hg), bem como alguns

<sup>23</sup> De modo geral, toxicidade é a capacidade de uma substância causar efeitos adversos num organismo vivo. De acordo com esta definição, muito geral, tais características podem incluir a radioactividade ou o excesso de calor, por exemplo, embora quando se fala em toxicidade usualmente se pense em termos de envenenamento químico. A determinação do nível de toxicidade de uma substância particular no ambiente levanta alguns problemas. Uma substância pode ser tóxica para um tipo de organismo e não para outro. Ou pode ser tóxica apenas se presente acima de uma certa concentração. Algumas formas de uma substância podem ser tóxicas enquanto outras formas químicas da mesma substância podem ser inofensivas. Por exemplo, o mercúrio inorgânico e o fenilmercúrio (orgânico) – constituintes comuns de efluentes industriais ricos em mercúrio – tendem a acumular-se nos sedimentos de fundo. Contudo, certas bactérias podem converter estas formas em compostos de metilmercúrio (orgânico), tóxicos, que entram na cadeia alimentar concentrando-se nos tecidos dos organismos.

---

elementos menos densos como o alumínio (Al), o arsénio (As) e o selénio (Se), são tóxicos, mesmo em concentrações relativamente baixas. Todos estes elementos são ubíquos e muitos deles são essenciais ao metabolismo das plantas, sob a forma de micronutrientes, como se referiu no capítulo anterior.

Os metais presentes na água podem ter origem natural a partir de erupções vulcânicas ou da erosão das rochas, ocorrendo raramente em concentrações elevadas e, neste caso, causando danos ambientais regra geral restritos. Os problemas mais graves surgem, no entanto, devido à sua introdução nos sistemas naturais a partir da actividade antrópica, com especial relevância para a exploração mineira, os processamentos metalúrgicos, o fabrico de papel e a destilação e queima de combustíveis fósseis. Os elementos que funcionam como micronutrientes essenciais, podem tornar-se tóxicos se a sua concentração ultrapassar o limiar de tolerância.

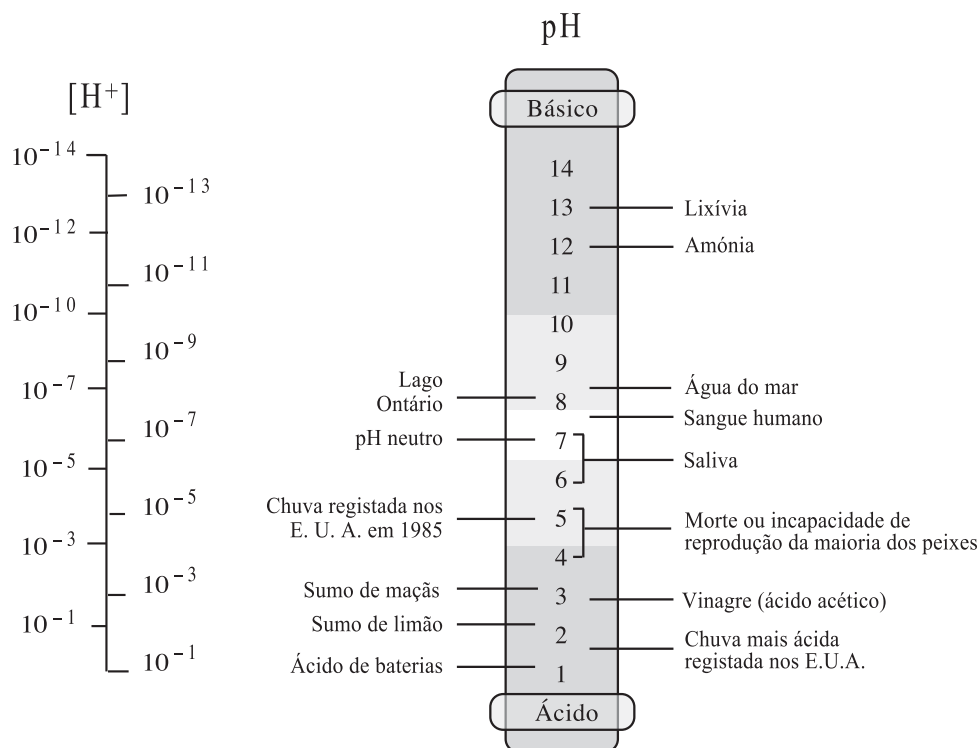
De entre os metais pesados, o Pb e o Hg receberam maior atenção porque são os mais tóxicos, produzindo efeitos devastadores nos organismos vivos. Os átomos destes metais ligam-se quimicamente a moléculas proteicas (tais como as enzimas), interferindo ou inibindo o seu funcionamento. A exposição prolongada a estas substâncias mesmo que em baixa concentração causa problemas neurológicos graves (especialmente nas crianças), bem como uma variedade de outros danos.

Os metais pesados bioacumulam-se nos tecidos gordos dos organismos que os ingerem, concentrando-se sucessivamente em níveis mais elevados da cadeia alimentar (biomagnificação).

### Ácidos<sup>24</sup>

A libertação de ácidos para a água de circulação (por exemplo o ácido sulfúrico das baterias), é prejudicial para o ambiente porque baixa o pH da água (Fig. 3.19), conduzindo ao estabelecimento de condições inóspitas para a maioria das formas de vida indígenas. A libertação destas substâncias em quantidades apreciáveis tem origem a partir da atmosfera (chuva ácida), ou através da drenagem de explorações mineiras de sulfuretos e tungstatos, entre outros (pirite, volframite).

<sup>24</sup> Um ácido é toda a substância que aumenta a concentração de hidrogénios (H<sup>+</sup>) quando dissolvida em água pura.



**Figura 3.19** – Escala de pH.

A acidificação da precipitação ocorre pela dissolução de ácidos ou de substâncias cuja solução aquosa tenha características ácidas, residentes na atmosfera. As substâncias podem ser produzidas por processos naturais (como o vulcanismo, por exemplo) e a sua precipitação faz parte dos processos também naturais de depuração da atmosfera, ou por actividade antrópica que emite volumes apreciáveis de óxidos de azoto (monóxido de azoto – NO –, dióxido de azoto – NO<sub>2</sub> –<sup>25</sup>) e dióxido de enxofre – SO<sub>2</sub>.

Estes poluentes são facilmente convertidos em substâncias ácidas através de reacções de oxidação na atmosfera, em presença de água:

- NO<sub>x</sub> → ácido azótico (HNO<sub>3</sub>);
- SO<sub>2</sub> → trióxido de enxofre (SO<sub>3</sub>);
- H<sub>2</sub>O + SO<sub>3</sub> → ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>).

Os principais impactos da chuva ácida incluem a morte de algumas espécies arbóreas ou arbustivas e peixes, a alteração da pedra de monumentos e a corrosão de metais. Os seus efeitos na saúde humana são ainda mal conhecidos, embora se pense que possa promover a dissolução de metais tóxicos das canalizações introduzindo-os na rede de abastecimento público a jusante dos

<sup>25</sup> O NO, instável, reage com o oxigénio para formar NO<sub>2</sub> e não é fácil medir concentrações destes dois gases independentemente. Assim, NO e NO<sub>2</sub> são normalmente reunidos e referidos como NO<sub>x</sub> total.

---

procedimentos de controle de qualidade adoptados. Grande parte da chuva ácida que cai na Europa Central e do Norte é oriunda da indústria da Grã-Bretanha, Alemanha e França; porém, a região com maiores problemas causados pela chuva ácida é a Europa de Leste, cujo crescimento industrial assenta no consumo de lignite (como fonte energética), um combustível económico, mas extremamente poluente.

A meteorização natural de sulfuretos (pirite, por exemplo) disseminados nas rochas em ambiente oxidante, mobiliza o enxofre para a água sob a forma de ácido sulfúrico. A oxidação de sulfuretos torna-se especialmente nociva quando estes minerais se concentram em depósitos volumosos, expostos ao ar e à água, em minas a céu aberto ou escombrelas. O escoamento assim produzido designa-se por drenagem ácida da mina ou escoamento ácido. A drenagem ácida da mina tem sido responsável por problemas de poluição das águas em grandes minas de carvão ou de sulfuretos (foi pela primeira vez oficialmente registada em 1698 nas minas de carvão da Pensilvânia). Contudo, para que ocorra drenagem ácida é necessário reunir certas condições, incluindo uma correcta combinação da mineralogia (predomínio dos minerais geradores de acidificação sobre outros, neutralizadores), com acesso e exposição adequados à água e ao oxigénio, o que nem sempre se verifica, pelo que esta consequência não ocorre em todas as minas de sulfuretos; efectivamente, a drenagem ácida será mitigada ou mesmo inibida se os sulfuretos forem não reactivos ou se a rocha contiver material alcalino suficiente para neutralizar a acidez resultante da meteorização dos sulfuretos.

A geologia do substrato e a composição química do solo são os principais factores que regulam a vulnerabilidade de um corpo de água superficial à acidificação. Como já se referiu anteriormente, a composição dos solutos de um corpo aquoso superficial é controlada em grande medida pela natureza das rochas que essa água atravessa ou que a contém. As rochas sedimentares, que são brandas em comparação com muitas rochas ígneas e metamórficas, tendem a ter taxas de meteorização elevadas. Isto significa que os sais solúveis que são capazes de neutralizar ou contrariar os efeitos da acidificação são libertados para a água superficial a uma taxa elevada. Lagos que se formam em rochas sedimentares calcárias, os quais contém grandes quantidades de calcite ( $\text{CaCO}_3$ ) e dolomite ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) que neutraliza os ácidos, são por isso resistentes à acidificação. Em contraste, rochas metamórficas e ígneas tendem a meteorizar e erodir mais devagar e os seus minerais constituintes tendem a ser menos solúveis. Lagos que ocorrem em rochas cristalinas duras, especialmente siliciosas tais como granitos, tendem a ser altamente vulneráveis à acidificação. Por vezes a acidificação dos lagos pode ser contrariada pela adição de calcário reduzido a pó.

<sup>26</sup> Base é qualquer substância que aumenta a concentração de OH<sup>-</sup> quando dissolvida em água.

## Bases<sup>26</sup>

A actividade antrópica pode igualmente causar aumento da alcalinidade da água superficial, embora este efeito seja mais raro que a acidificação. A libertação súbita de uma substância cáustica como a amónia (NH<sub>3</sub>), cal (CaO), hidróxido de sódio (NaOH) ou lixívia provocará este efeito:

- NaOH (s) → Na<sup>+</sup> (aq) + OH<sup>-</sup> (aq);
- NH<sub>3</sub> (g) + H<sub>2</sub>O (l) ↔ NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (aq) + OH<sup>-</sup> (aq).

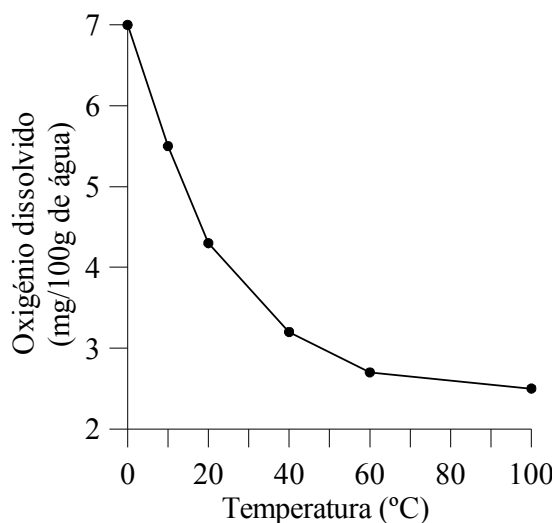
Algumas formas de uso da terra podem também contribuir para aumentar a alcalinidade. Por exemplo, a irrigação excessiva, como se referiu no Capítulo 2, pode provocar um aumento da salinidade e conseqüentemente da alcalinidade do solo.

### 3.7.3.6 Poluição térmica

A poluição térmica pode definir-se como o aumento excessivo da temperatura de um corpo aquoso devido à actividade antrópica. Muitos processos industriais e produtores de energia libertam efluentes, sobreaquecidos relativamente ao ambiente receptor. A temperatura é reguladora da fisiologia dos organismos, controlando os seus ciclos de vida e as suas funções vitais. Assim, o excesso de calor pode afectar ou mesmo eliminar plantas e animais presentes no sistema aquático e, uma vez eliminadas as populações naturais, pode haver lugar a recolonização por espécies indesejáveis (como as cianobactérias por exemplo), adaptadas a ambientes mais quentes.

As propriedades físicas e químicas da água são igualmente afectadas pela temperatura. Efectivamente, a solubilidade dos gases e em particular do oxigénio<sup>27</sup>, diminui com o aumento da temperatura (Fig. 3.20). Por outro lado, muitos dos elementos presentes no ambiente aquático (como o cloro, por exemplo), apresentam níveis de toxicidade mais elevados a temperaturas mais altas.

<sup>27</sup> Um aumento de 10°C reduz a solubilidade de O<sub>2</sub> na água em cerca de 20%.



**Figura 3.20** – Variação do oxigênio dissolvido na água em função da temperatura.

### 3.7.3.7 Sólidos em suspensão

Nem todos os contaminantes ocorrem na água como constituintes dissolvidos. Partículas sólidas, com dimensão variável entre alguns milímetros e micrômetros (colóides) podem ser transportadas em suspensão e podem actuar como poluentes se se acumularem em concentrações prejudiciais. Alguns processos industriais libertam poluentes sólidos em suspensão: a indústria de fabrico de papel descarrega diariamente centenas de toneladas de aparas de madeira incorporadas nos efluentes líquidos; visto que estes sólidos são componentes orgânicos, induzem carência bioquímica de oxigénio e turvam a água no reservatório receptor. Outro problema relacionado com os sólidos em suspensão, resulta da sua sedimentação no fundo do corpo aquoso, onde podem literalmente sufocar os organismos residentes ou reduzir a intensidade luminosa disponível para as plantas aquáticas, por efeito de turvação da coluna de água.

### 3.7.3.8 Radioactividade

A radioactividade consiste na propriedade de emissão espontânea de radiação que caracteriza alguns elementos ou compostos. As substâncias radioactivas atingem as águas naturais a partir de descargas das centrais nucleares, da exploração de minerais radioactivos, detonação de armas nucleares ou de aplicações médicas e científicas. Para além da solubilização ou suspensão aquosa, os elementos radioactivos podem ainda alcançar os reservatórios de

água por deposição atmosférica ou erosão dos solos. A radioactividade tem efeitos negativos nos seres vivos, entre os quais se podem citar o cancro, as mutações e a esterilidade.

### 3.7.4 *Poluição da água subterrânea*

Os principais tipos e fontes de contaminação da água subterrânea são na generalidade idênticos aos que contaminam as águas superficiais. No entanto, os processos de introdução destas substâncias no sistema subterrâneo, as interações com o meio envolvente e os processos de propagação são muito diferentes. A contaminação da água subterrânea é mais difícil de detectar, controlar e eliminar do que a da água superficial porque não se vê.

A tabela 3.8 lista as principais fontes de poluição da água subterrânea. Apenas uma delas é intencional: os poços de injeção profundos, instrumentos de bombeamento de resíduos para um reservatório subterrâneo.

**Tabela 3.8** – Principais fontes de poluição de água subterrânea.

Acidental	Intencional
Percolação a partir da superfície	1. Poços de injeção (profundos)
1. Lixeiras e aterros sanitários	
2. Lagoas artificiais para tratamento de águas residuais	
3. Derrames	
4. Agricultura e usos do território (fertilizantes, resíduos animais, sal para derreter o gelo das estradas)	
Fugas subterrâneas	
5. Fossas sépticas	
6. Enterramento de resíduos	
7. Reservatórios de armazenamento subterrâneo (combustíveis)	

Idealmente, o reservatório receptor deve estar separado de outros aquíferos e, nomeadamente, dos utilizados para abastecimento, por barreiras impermeáveis tais como bancadas argilosas. As oito principais fontes de poluição não intencional de água subterrânea podem ser divididas em três categorias, sendo uma delas a intrusão salina. As outras duas são: a percolação a partir da superfície e as fugas de armazéns subterrâneos. Em qualquer destes casos, o acesso de substâncias poluentes aos reservatórios de água subterrânea ocorre sempre

---

que a barreira impermeável (natural ou artificial) que contém os volumes de água contaminada é rota por causas naturais (fracturação, por exemplo) ou deficiência de construção.

#### 1.7.4.1 Poluentes da água subterrânea

Qualquer poluente da água subterrânea apresenta as seguintes características fundamentais:

1. elevada solubilidade na água;
2. resistência à biodegradação;
3. concentração elevada;
4. toxicidade para os seres humanos.

Os principais poluentes da água subterrânea são os agentes patogénicos e as substâncias químicas, orgânicas e inorgânicas.

#### Agentes patogénicos

A fonte mais comum de poluição da água subterrânea por agentes patogénicos são os efluentes domésticos não tratados, e têm origem diversa: drenagem de fossas sépticas, rupturas dos colectores de esgoto, impermeabilização defeituosa das albufeiras de tratamento de águas residuais, a que se adicionam resíduos animais, entre outros. A extensão e prejuízo associados a este tipo de contaminação depende muito da porosidade, permeabilidade e litologia do aquífero afectado. Se a água poluída percolar através de rochas muito permeáveis, com poros intergranulares ou fracturas de grande dimensão (conglomerados ou calcários carsificados), pode percorrer rapidamente grandes distâncias, conservando níveis de poluição elevados. Pelo contrário, se percolar através de materiais detríticos com poros de pequena dimensão (areias ou arenitos permeáveis), pode auto-depurar-se a pouca distância (menos de 30m da fonte poluidora em alguns casos) visto que muitos dos agentes patogénicos são semelhantes em dimensão aos grãos de silte e areia fina e são literalmente filtrados no interior do aquífero ou ainda na zona não saturada. A contaminação bacteriana raramente alcança mais que algumas dezenas de metros a partir da fonte poluente, excepto em calcários fracturados ou conglomerados. Os vírus, podem migrar centenas de metros ou mais em formações ricas em matéria orgânica (embora 20-30m seja o valor mais comum). Em materiais argilosos, os microrganismos podem ainda ser adsorvidos à

---

superfície dos minerais de argila, contribuindo para a contenção do processo de contaminação.

### Substâncias químicas orgânicas e inorgânicas

Qualquer substância poluente, orgânica ou inorgânica, pode atingir a água subterrânea e contaminá-la, se os reservatórios de armazenagem subterrânea perderem a estanquicidade. Estes reservatórios são especialmente frequentes e volumosos em pontos de abastecimento de combustíveis, refinarias de hidrocarbonetos e outras unidades industriais, e representam uma das mais importantes fontes de poluição da água subterrânea, no Canadá e nos E.U.A.

Vinte dos vinte e cinco principais contaminantes da água subterrânea são compostos orgânicos voláteis constituintes da gasolina como o benzeno, o etileno, o xileno e o tolueno (juntos referidos como BTEX), e todos são reconhecidos como carcinogénicos. Os solventes orgânicos como o tricloroetileno (TCE) também constituem problema significativo para a qualidade da água subterrânea em muitos locais. O TCE é usado como solvente em indústrias de processamento de metais e na limpeza a seco, para remoção de gorduras. É também usado como agente descafeinante e entra no fabrico de pesticidas, alcatrão, tintas e vernizes.

Produtos agroquímicos como os pesticidas e os fertilizantes, quando aplicados de forma indiscriminada, podem poluir a água subterrânea em vastas áreas. A vulnerabilidade de um aquífero a este tipo de contaminação depende de muitas variáveis e é difícil de sistematizar. Por exemplo, as propriedades físicas e químicas do solo, como a permeabilidade e o teor de humidade controlam a taxa de infiltração destes químicos; as propriedades fisico-químicas destes produtos tais como a taxa de deterioração ou de vaporização, determinam quais são capazes de atingir e contaminar a água subterrânea; outros factores, tais como o clima, o modo e momento de aplicação, também regulam a sua importância como contaminantes. Os adubos azotados, por exemplo, são transformados em poucas semanas em  $\text{NO}_3^-$ . Este ião não é adsorvido nem precipitado no solo, sendo facilmente lixiviado pela água de infiltração. Os efeitos da adição de nitratos na qualidade da água subterrânea não são imediatos, possivelmente porque muito do lixiviado percola lentamente através da zona não saturada. Assim, pode haver um atraso considerável entre o momento de aplicação do fertilizante e o conseqüente aumento da concentração de nitrato na água subterrânea. Este efeito de retardamento, frequentemente da ordem dos 10 anos ou mais, dificulta o estudo das relações entre aplicação de fertilizantes e poluição da água subterrânea por nitratos. Uma preocupação adicional resultante deste facto é o “compromisso de poluição” futura que resulta da utilização actual de agroquímicos azotados, a que se associam níveis

de nitrato já inaceitavelmente elevados hoje em dia, e perspectivas de consumo e utilização crescentes de adubos azotados no futuro. Na Europa, os níveis mais elevados de nitrato nas águas subterrâneas encontram-se na Eslovénia, onde 50% dos locais monitorizados apresentam concentrações superiores a 5,6mgN/l (25mgNO<sub>3</sub>/l)<sup>28</sup>. Em 8 países europeus (entre os quais se inclui Portugal) este nível é excedido em cerca de 25% dos locais monitorizados; na Europa Central e do Sul, o valor máximo admissível para água de consumo humano é já ultrapassado num número considerável de locais.

A determinação analítica dos pesticidas no ambiente é tarefa complexa e dispendiosa e, por estas razões, apenas alguns destes poluentes são monitorizados. Em muitos países europeus, como a Eslovénia, a Áustria, a França, o Reino Unido e a Alemanha, foram encontradas concentrações de pesticidas na água subterrânea que excedem 0,1mg/l (concentração máxima admissível para consumo humano).

A poluição da água subterrânea por metais pesados, oriundos principalmente de aterros sanitários, actividades mineiras e descargas industriais, constitui um problema em muitos países europeus – principalmente em Espanha, França, Suécia e na generalidade dos países da Europa de Leste.

### 3.7.5 *Comportamento dos contaminantes na água subterrânea*<sup>29</sup>

Uma vez libertado no seio de um reservatório, o comportamento de qualquer contaminante é influenciado por diferentes factores, incluindo a sua taxa de decaimento ou de decomposição natural, o tempo de residência no reservatório, os mecanismos de transporte e a interacção com outros elementos presentes na água e na rocha hospedeiras.

#### 3.7.5.1 Decaimento e decomposição

A estabilidade química é um dos factores determinantes do comportamento de um contaminante em meio aquoso. Muitos contaminantes perigosos são instáveis e decompõem-se naturalmente noutras substâncias quer espontaneamente quer por interacção com outros elementos presentes. Estas transformações ocorrem através da biodegradação, implicando interacção com microorganismos, por decaimento espontâneo radioactivo, ou simplesmente através de reacções químicas com outros elementos ou substâncias presentes, que modificam ou decompõem a substância poluente. Os contaminantes que resistem muito tempo à decomposição ou decaimento são referidos como persistentes e constituem as substâncias mais preocupantes em termos

<sup>28</sup> Concentrações até 2,3mgN/l (10mgNO<sub>3</sub>/l) são consideradas próximas das concentrações naturais. O valor 5,6mgN/l (25mgNO<sub>3</sub>/l) é considerado nível de referência e a concentração de 11,3mgN/l (50mgNO<sub>3</sub>/l) é o máximo admissível para consumo humano.

<sup>29</sup> Tópicos igualmente válidos no caso das águas superficiais.

---

ambientais. São exemplos o Plutônio 239 ( $^{239}\text{Pu}$ ), radionuclido com um período de semi-vida de 24 000 anos ou o DDT, que se decompõe naturalmente no ambiente a um ritmo extremamente lento. O DDT e os produtos da sua decomposição tendem a permanecer na água ou nos sedimentos durante vários anos e, por essa razão, são retidos nos tecidos dos organismos vivos através de processos de bioconcentração (bioacumulação e biomagnificação). Embora o uso do DDT nos E.U.A tenha sido restringido nos anos 70, os níveis deste produto detectados nos organismos aumentaram até aos anos 80.

### 3.7.5.2 Tempo de residência

Qualquer substância, uma vez mobilizada, tende a circular de um reservatório para outro e a quantidade de tempo que em média permanece num dado reservatório é referida como o seu tempo de residência. O chumbo, por exemplo, usado até há pouco tempo como aditivo anti-detonante na gasolina, deriva de um reservatório geológico, nomeadamente de um mineral como a galena ( $\text{PbS}$ ). Uma vez extraído, processado, incorporado no combustível e finalmente emitido pelo sistema de escape, o chumbo entra no reservatório atmosférico a partir do qual pode sedimentar ou entrar no reservatório hidrológico (rio ou oceano) por via do escoamento superficial. Ali, pode acumular-se nos sedimentos de fundo ou nos tecidos de animais ou plantas ou ainda alcançar um reservatório subterrâneo. O tempo de residência do chumbo no reservatório geológico é da ordem dos milhares de anos, na atmosfera é de cerca de 2 semanas (porque, entre outras razões, o Pb é pesado e não é facilmente transportado pelo ar) e nas águas pode ser de alguns anos.

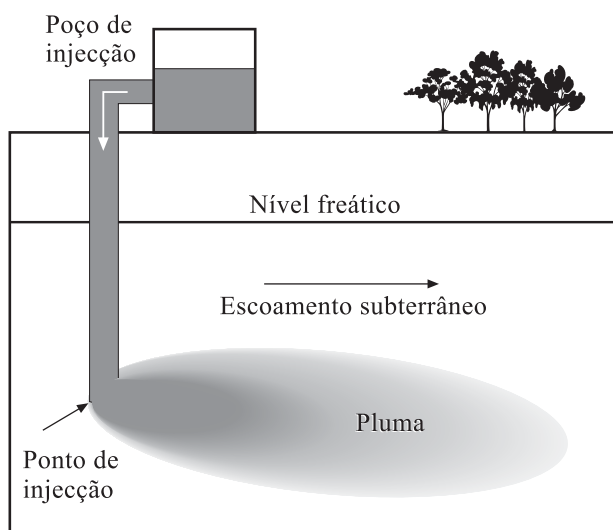
O tempo de residência é difícil de determinar, porque depende de um elevado número de variáveis, incluindo as características físicas e químicas das substâncias (tais como a sua estabilidade), as características específicas do meio envolvente (ar, água, solo, rocha ou biota) e as interacções possíveis entre contaminante e outras substâncias presentes no reservatório.

### 3.7.5.3 Transporte dos contaminantes

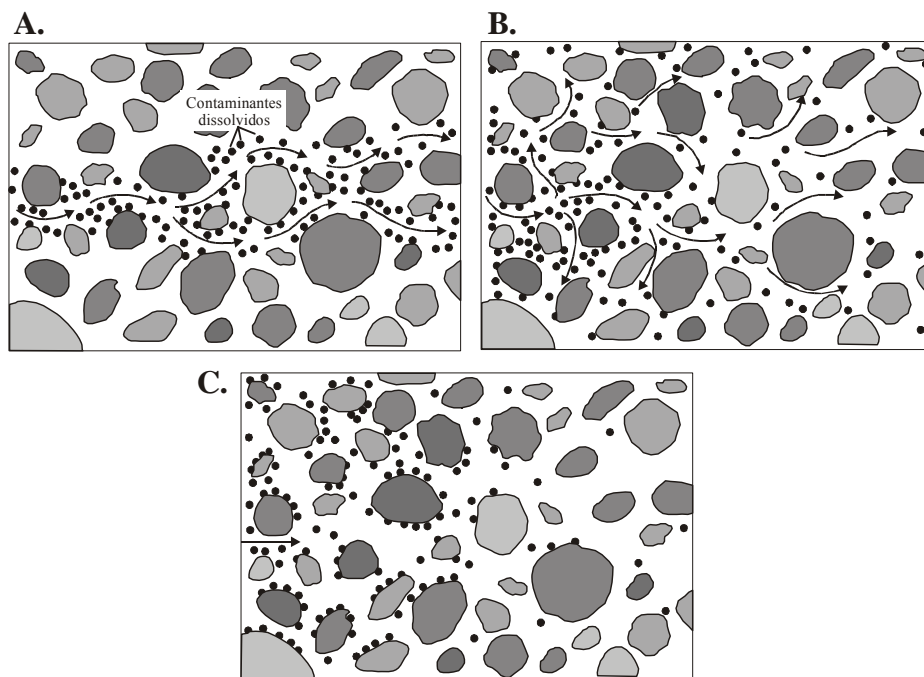
Os contaminantes solúveis viajam na água subterrânea formando com ela uma mistura homogénea. Os poluentes viajam a partir da fonte na forma de uma massa dispersiva ou pluma de água subterrânea contaminada (Fig. 3.21) e a direcção de transporte depende do padrão do fluxo regional da água subterrânea. O fluxo normal da água subterrânea e substâncias dissolvidas através de um meio permeável é chamado advecção ou fluxo advectivo (Fig. 3.22). Se um

contaminante é transportado por advecção aproximadamente à mesma taxa que o suporte aquoso, é referido como sendo não retardado. Mas outros contaminantes há, que viajam mais lentamente que a água subterrânea, ou seja, sofrem um atraso relativo, que pode ser definido como:

$$rf = \frac{V_{gw}}{V_c}$$



**Figura 3.21** – Forma da pluma de contaminação da água subterrânea.



**Figura 3.22** – Processos que afectam a distribuição dos contaminantes na água subterrânea. A – Fluxo advectivo. B – Dispersão. C – Adsorção.

onde  $r_f$  é o factor de atraso,  $V_{gw}$  é a velocidade de percolação da água subterrânea e  $V_c$  a velocidade do movimento do contaminante. Há três mecanismos principais que introduzem atraso: adsorção, dispersão e biodegradação. A adsorção é um processo de adesão superficial das partículas do contaminante (átomos, iões, moléculas) aos minerais da rocha hospedeira para os quais são atraídos por forças de natureza eléctrica (Fig. 3.22). A dispersão modifica o fluxo advectivo do contaminante, forçando percursos que divergem da direcção de escoamento principal, contornando partículas de sedimento (Fig. 3.22). Aquela resulta da presença de heterogeneidade da permeabilidade e porosidade do aquífero e de pequenas diferenças na velocidade de escoamento a escala muito fina: o escoamento é mais rápido nos poros maiores do que nos mais pequenos porque os efeitos de atrito e interacção sólido-água são menos importantes no primeiro caso. Também a água flui mais rapidamente no centro dos poros do que na sua periferia, onde a resistência ao escoamento é maior. Embora a direcção de fluxo do contaminante seja a do gradiente hidráulico regional, a forma do volume contaminado modifica-se: torna-se alongado e pode inclusivamente irradiar perpendicularmente à direcção de fluxo. A dispersão é a causa primária da forma em pluma característica das regiões contaminadas dos aquíferos (Fig. 3.21). Com o tempo, alguns contaminantes são biodegradados, muitas vezes com ajuda da população bacteriana ou degradam-se por via química no ambiente subterrâneo. A biodegradação de uma pluma contaminante é possível em condições aeróbias ou anaeróbias, dependendo das características da pluma e dos contaminantes presentes. Adsorção, dispersão e biodegradação combinam-se para retardar o movimento de um contaminante, dispersá-lo numa área vasta e, eventualmente, reduzir a sua concentração na água subterrânea.

A monitorização de um contaminante não retardado é um processo eficiente de traçagem do movimento de uma pluma contaminante. O traçador mais frequentemente usado é o ião cloreto (Cl<sup>-</sup>), constituinte não retardado comum em muitas plumas contaminantes. O aumento súbito da concentração de Cl<sup>-</sup> num poço limpo, pode prenunciar a presença próxima e a chegada eminente da porção retardada de uma pluma contaminante.

Os contaminantes imiscíveis em água têm um destino no reservatório subterrâneo que depende parcialmente da sua densidade. Se o líquido contaminante é menos denso que a água designa-se LNAPL (fase líquida não aquosa leve) e se é mais denso DNAPL (fase líquida não aquosa densa). O petróleo é o contaminante LNAPL mais comum e o tricloroetileno (TCE) é exemplo de um contaminante DNAPL comum. Uma pluma contaminante composta por petróleo infiltra-se no subsolo até atingir a zona saturada, concentra-se no topo da coluna de água subterrânea, ao nível da superfície freática, e tende a difundir-se formando um corpo lenticular. Em oposição, uma pluma de TCE infiltra-se na zona de aeração e desce na zona saturada,

---

concentrando-se junto ao substrato. As plumas DNAPL podem ser extraordinariamente difíceis de monitorizar e de controlar.

Os contaminantes podem percorrer longas distâncias transportados pelos ventos, pela água e pelos organismos vivos, sendo essa distância proporcionalmente maior quanto mais persistente for a substância contaminante. A análise de tecidos de animais selvagens do Ártico revelaram quantidades traço de PCBs e pesticidas, originados nas regiões agrícolas e industriais da Europa, Ásia e América do Norte. A mobilidade e persistência de alguns contaminantes implica que os níveis de poluição induzidos por fontes locais pode ser aumentada significativamente por contaminantes originados em áreas distantes. Um exemplo desta situação ocorre no Rio St. Lawrence (Canadá) com 1500km de comprimento entre o Lago Ontario, a montante, até ao Oceano Atlântico. O seu estuário é afectado principalmente pela poluição por pesticidas originada a montante, na bacia dos Grandes Lagos, que predomina sobre a contaminação proveniente da indústria, agricultura e navegação estabelecida ao longo das margens.

#### 3.7.5.4 Interação e sinergismo

Algumas substâncias químicas têm um grau de toxicidade baixo quando isoladas mas, quando misturadas com outras substâncias, podem potenciar a sua toxicidade. Este efeito, no qual a resultante da mistura é maior que a soma dos componentes individuais, designa-se por sinergismo. Num sistema como o dos Grandes Lagos, por exemplo, no qual foram identificados mais de três centenas de contaminantes químicos, o potencial de geração de efeitos sinérgicos negativos é muito elevado. Por vezes, as interações entre um contaminante e o meio envolvente têm consequências positivas na qualidade da água. É o que acontece com as partículas de argila existentes nos fundos vasosos dos rios, lagos ou componentes dos aquíferos, as quais, porque carregadas negativamente, atraem e adsorvem catiões metálicos dissolvidos, constituindo um mecanismo natural de autodepuração da água superficial e subterrânea. Contudo, este processo pode conduzir a acumulações significativas destes contaminantes nos sedimentos, o que não constitui necessariamente um problema ambiental desde que o sedimento permaneça imperturbado; no entanto, a sua mobilização – por dragagem ou escavação por exemplo – pode libertar subitamente potenciais substâncias de risco em concentrações apreciáveis.

### 3.8 Aumento dos recursos hídricos

Até há pouco tempo atrás, os recursos hídricos eram tidos como certos, pelo que o seu consumo não era objecto de preocupação nem de controle especiais. Tal significa que os recursos hídricos totais podem aumentar com relativa facilidade, desde que se evitem no futuro próximo os desperdícios efectuados no passado. Existem medidas práticas para alcançar este objectivo, que passam por um aumento da eficiência dos consumos (que envolvem modificações de carácter tecnológico na agricultura e na indústria, e sociais no que respeita ao consumo doméstico) e pela reciclagem das águas residuais. No entanto, é igualmente inevitável reduzir os níveis actuais de poluição, pela adopção de medidas que incluem, por ordem crescente de custos:

- 1) redução da poluição na fonte, através da reciclagem e substituição de contaminantes por produtos com equivalência funcional mas menos poluentes;
- 2) tratamento dos efluentes antes da descarga nos reservatórios naturais (nomeadamente através da construção de ETAR – Estação de Tratamento de Águas Residuais); nestas estações, o tratamento primário consiste na filtração de partículas maiores e decantação (sedimentação) dos restantes sólidos em suspensão. O tratamento secundário consiste na decomposição dos compostos orgânicos por acção bacteriana, sendo as bactérias eliminadas no final do ciclo de processamento com um desinfectante. Finalmente, o tratamento terciário envolve uma série de depurações químicas, destinadas à remoção de poluentes específicos, como compostos orgânicos industriais, fosfatos e nitratos;
- 3) limpeza das águas naturais após poluição (despoluição).

#### 3.8.1 *Despoluição da água subterrânea*

A limpeza das plumas de água subterrânea contaminada pode ser extremamente dispendiosa, implicar problemas técnicos complexos e desencorajadores, bem como questões legais e financeiras problemáticas. Há duas atitudes essenciais quanto ao problema da limpeza da água subterrânea: as soluções activas e passivas. As soluções passivas implicam a atitude de “deixar a natureza seguir o seu curso”. Como já foi mencionado antes, a adsorção/absorção, dispersão e biodegradação são processos naturais que ocorrem no ambiente de subsuperfície e que contribuem para a diluição e degradação dos contaminantes. As bactérias aeróbias degradam químicos como o benzeno, etileno e xileno e as bactérias anaeróbias degradam solventes orgânicos cloretados. Contudo, a biodegradação natural pode operar muito devagar, especialmente nas regiões onde a água subterrânea é fria; efectivamente, a actividade bacteriana é maior

a cerca de 25°C, uma temperatura invulgarmente elevada nos reservatórios subterrâneos. Em contraste, as soluções activas envolvem uma gama de intervenções tecnológicas que se dividem em três categorias principais: contenção, remoção e tratamento *in situ*. A contenção (ou isolamento) da pluma contaminada previne a sua expansão ou migração para o exterior da fonte, por interposição de barreiras impermeáveis (escavação de trincheiras ou colocação de paredes de contenção subterrâneas). Em alguns casos pode ser mais eficiente a remoção física do contaminante (por bombagem), como no caso dos LNAPL e DNAPL (a remoção destes últimos pode implicar injeção de solventes para facilitar o fluxo do contaminante). O tratamento *in situ* é efectuado no local, estabilizando o contaminante ou acelerando o processo natural de degradação e diluição (por exemplo, através da adição de oxigénio para a estimulação da biodegradação aeróbia ou de tipos específicos de bactérias anaeróbias – bioestimulação). No caso de contaminantes inorgânicos não biodegradáveis, é possível injectar químicos que induzem a precipitação das substâncias contaminantes, possibilitando a sua retirada posterior da água ou a sua imobilização.

### 3.8.2 Dessalinização

A dessalinização da água salgada é um processo de aumentar a quantidade de água disponível<sup>30</sup>. Há dois métodos essenciais de dessalinização: filtração e destilação. Nos sistemas de filtração, a água é passada através de filtros ou membranas finas, a alta pressão. A vantagem deste método é a capacidade de processamento de grandes volumes de água: uma central municipal de filtragem pode produzir vários milhares de milhões de litros de água purificada por dia; mas tem a desvantagem de ser eficiente em águas com baixos níveis de salinidade (os filtros não são eficientes em água do mar, por exemplo), pelo que esta solução é utilizada para tratar águas subterrâneas ou superficiais salobras. A destilação envolve um ou mais ciclos de vaporização-condensação e concentração dos solutos minerais no líquido remanescente. É um método adequado quer para água do mar quer para águas salobras. Contudo, exige uma fonte de calor permanente e intensa e os custos da energia reflectem-se nos preços da água purificada por destilação. O carvão, gás natural ou petróleo podem ser usados como fonte energética mas além de dispendiosos (e poluentes), os combustíveis convencionais são cada vez mais escassos. A energia solar seria uma alternativa possível às fontes de calor convencionais mas a sua eficiência é ainda limitada por dificuldades tecnológicas. A água dessalinizada pode ser 5 a 10 vezes mais cara do que a água bombeada directamente de um rio ou aquífero. Este facto pode não ser um problema crucial para o uso doméstico mas é-o certamente para os consumos agrícolas na medida em que esta tem de ser competitiva com a de outras regiões onde a

<sup>30</sup> A dessalinização constitui 5% dos recursos hídricos no Chipre, 46% em Malta e 10% em Maiorca.

---

dessalinização não é necessária, diminuindo os custos de produção. Outro problema é a produção de sal em volumes consideráveis: por cada 3800l de água salgada são produzidos cerca de 91kg de sal. Uma central de dessalinização em funcionamento pleno origina centenas a milhares de kg de sal que têm de ser removidos diariamente; a sua reutilização imediata não é possível, visto que a generalidade deste resíduo não está suficientemente limpo.

### Actividade 3.2

1. Quais são os valores típicos de porosidade de uma areia, de um arenito e de um calcário fracturado?
2. Explique porque é que uma formação rochosa (ou solo) tem de ser porosa e permeável para constituir um aquífero.
3. Um poluente migra mais rapidamente através de uma areia grosseira bem calibrada ou de uma areia fina mal calibrada? Porquê?
4. Qual dos aquíferos lhe parece ser mais eficiente na produção de água para um furo: arenito pouco consolidado, arenito ou granito não fracturado? Porquê?
5. Explique como se relaciona a lei de Darcy com o fluxo de poluentes no reservatório subterrâneo.
6. Liste modos comuns de entrada de poluentes no reservatório subterrâneo.
7. Como é que a dispersão contribui para a formação de plumas contaminantes na água subterrânea?
8. O que é um cone de depressão?
9. Explique porque são os lagos mais facilmente poluídos do que os rios.
10. Explique porque é que a água subterrânea é facilmente poluída e indique um dos métodos utilizados na sua despoluição.
11. Num aquífero confinado com uma condutividade hidráulica de 50m/dia e uma porosidade de 35% existem dois piezómetros distanciados de 500m, alinhados no sentido do fluxo e com um  $\delta h = 2m$ . O piezómetro a montante é sentinela do outro que abastece uma população e tem como função detectar precocemente contaminação.
  - a) Calcule o gradiente hidráulico do aquífero local.
  - b) Quanto tempo após o piezómetro sentinela estar contaminado se espera que o furo de abastecimento também o esteja?

Resultado: a) 0,004; b) 2,4 anos.

---

## Bibliografia

ARMS, K.

1990 *Environmental science*. Saunders College Publishing, 468 p.

BELL, F. G.

1998 *Environmental Geology. Principles and Practice*. Blackwell Science, 594 p.

BENNETT, M. R. e DOYLE, P.

1997 *Environmental Geology. Geology and the human environment*. John Wiley & Sons, 501 p.

BLATT, Harvey

1997 *Our Geologic Environment*. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 541 p.

CARAPETO, C.

1999 *Poluição das águas. Causas e efeitos*. Universidade Aberta, n.º 170, 241 pp.

COATES, D. R.

1981 *Environmental Geology*. John Wiley & Sons, 701 p.

CUNNINGHAM, W. P. e SAIGO, B. W.

1995 *Environmental Science. A global concern*. 3.ª edição. WCB Publishers, 612 p.

CUSTODIO, E. e LLAMAS, M. R.

1983 *Hidrologia subterrânea*. 2.ª edição, Tomo I, Ediciones Omega, S. A., 1157 p.

EUROPEAN ENVIRONMENTAL AGENCY

1998 *Europe's Environment: the Second Assessment*. Elsevier Science, 293 p.

FERREIRA, J. P.; OLIVEIRA, M. M. e CIABATTI, P.

1995 *Desenvolvimento de um inventário de águas subterrâneas de Portugal*. Vol. I, LNEC, 525 p.

FERREIRA, J. P.; OLIVEIRA, M. M. e MOINANTE, M. J.

1995 *Desenvolvimento de um inventário de águas subterrâneas de Portugal*. Vol. II, LNEC, 514 p.

---

ICE

1991 *Acid rain. Topics in Chemistry*, Institute for Chemical Education, Madison, Wisconsin, 55 p.

INSTITUTO DA ÁGUA

2000 *Recursos Hídricos de Portugal Continental e sua utilização*. Volume 2, 370 p.

McKINNEY, M. L. e SCHOCH, R. M.

1998 *Environmental Science. Systems and Solutions*. Jones and Bartlett Publishers, 639 p.

MERRITTS, D.; WET, A. e MENKING, K.

1997 *Environmental Geology. An Earth System Science Approach*. W. H. Freeman and Company, New York, 452 p.

MORAN, J. M.; MORGAN, M. D. e WIERSMA, J. H.

1986 *Introduction to Environmental Science*. W. H. Freeman and Company, 2.<sup>a</sup> edição, 709 p.

MURCK, B. W.; SKINNER, B. J. e PORTER, S. C.

1996 *Environmental Geology*. John Wiley & Sons, Inc., 535 p.

TURK, J. e THOMPSON, G. R.

1995 *Environmental geoscience*. Saunders College Publishing, 428 p.

MONTGOMERY, C. W.

1995 *Environmental Geology*. 4.<sup>a</sup> edição, WCB Publishers, 496 p.

---

## **4. Recursos energéticos**

Página intencionalmente em branco

---

## SUMÁRIO

---

- 4.1 **O Homem e a energia**
- 4.2 **Combustíveis fósseis**
  - 4.2.1 *Turfa e carvão*
  - 4.2.2 *Petróleo e gás natural*
    - 4.2.2.1 Reservatórios de petróleo e de gás natural
    - 4.2.2.2 Armadilhas de petróleo e de gás natural
- 4.3 **Recursos de petróleo e gás não convencionais**
  - 4.3.1 *Argilitos e arenitos betuminosos*
  - 4.3.2 *Gás natural hidratado*
- 4.4 **Disponibilidade dos combustíveis fósseis**
  - 4.4.1 *Petróleo*
  - 4.4.2 *Gás natural*
  - 4.4.3 *Carvão*
  - 4.4.4 *Recursos não convencionais*
  - 4.4.5 *Exploração secundária das jazidas de petróleo*
- 4.5 **Problemas ambientais resultantes da produção e utilização de combustíveis fósseis**
  - 4.5.1 *Extracção e queima de carvão*
  - 4.5.2 *Extracção, transporte e processamento de petróleo e gás natural*
  - 4.5.3 *Extracção e processamento de argilitos e arenitos betuminosos*
- 4.6 **Energias alternativas**
  - 4.6.1 *Energias renováveis*
    - 4.6.1.1 Energia solar
    - 4.6.1.2 Energia geotérmica
    - 4.6.1.3 Hidroenergia
    - 4.6.1.4 Energia das marés e das ondas
    - 4.6.1.5 Energia eólica
    - 4.6.1.6 Biomassa
    - 4.6.1.7 Conversão de energia térmica oceânica (OTEC)
  - 4.6.2 *Energia não renovável – a energia nuclear*
    - 4.6.2.1 Fissão
    - 4.6.2.2 Reservas de urânio
    - 4.6.2.3 Problemas ambientais relacionados com a energia nuclear
    - 4.6.2.4 Fusão

---

## Objectivos

Conhecer a origem dos combustíveis fósseis, a sua disponibilidade para geração de energia e os problemas ambientais com eles relacionados:

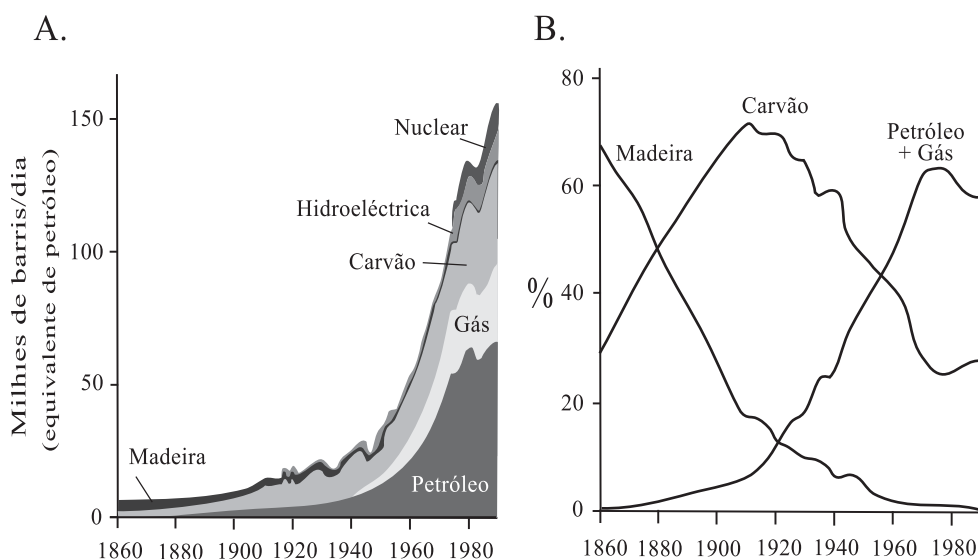
- Conhecer recursos energéticos não convencionais e a sua capacidade para fornecimento de energia;
- Conhecer fontes energéticas alternativas (renováveis e não renováveis) e discutir as vantagens e desvantagens da sua utilização.

**Palavras-chave:** energia, hidrocarbonetos, combustíveis fósseis, eficiência energética, reservas, recursos, gás natural, petróleo, armadilha de petróleo, rocha fonte, rocha reservatório, rocha de cobertura, carvão, drenagem ácida da mina, efeito de estufa, recursos não convencionais, argilitos betuminosos, fontes energéticas alternativas, energia renovável, recurso estacionário, energia geotérmica, energia eólica, células fotovoltaicas, painéis solares, hidroenergia, barragens, biomassa, energia das ondas, energia das marés, OTEC, energia eólica, quintas de vento, energia não renovável, energia nuclear, isótopos radioactivos, fissão, reactores reprodutores, resíduos radioactivos, fusão.

## 4.1 O Homem e a energia

O Homem depende em permanência e cada vez mais da energia. O consumo da energia per capita é, numa sociedade actual, tecnologicamente desenvolvida, pelo menos 100 vezes superior ao que era há cerca de 1Ma, nos primórdios da Humanidade, e cerca de 6 vezes superior ao que era há menos de 200 anos (Tabela 4.1). A energia total consumida aumentou muito mais drasticamente do que o uso de energia per capita e hoje, a nível mundial, utiliza-se 70 vezes mais energia do que em 1865.

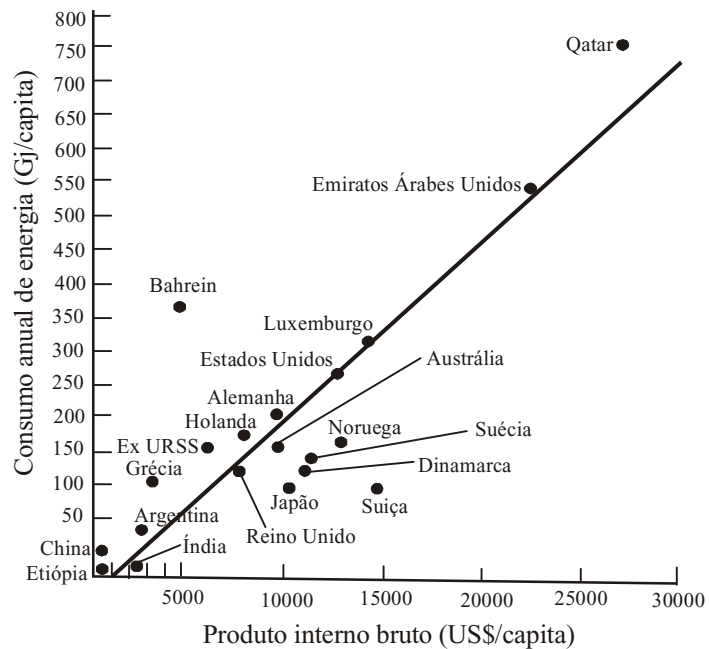
Até há cerca de 300 anos, a grande maioria das necessidades energéticas do Homem era satisfeita por fontes “tradicionais”: produtos agrícolas, força de braços e de animais, biomassa, pequenas quantidades de carvão, vento e água. Com a Revolução Industrial na Europa, durante os finais do século XVIII e início do século XIX, as necessidades energéticas aumentaram, conduzindo à utilização em larga escala inicialmente do carvão (devido ao desenvolvimento de tecnologias como a máquina a vapor) e mais tarde dos produtos derivados do petróleo (devido ao desenvolvimento de tecnologias que consumiam combustível líquido). Por alturas da 2ª Guerra Mundial, o petróleo era praticamente tão utilizado como o carvão, aumentando a partir de então a sua importância como fonte de energia necessária para satisfazer o grande crescimento no consumo (Fig. 4.1). No século XX o desenvolvimento da energia eléctrica aumentou o consumo de energia e mudou a importância relativa das fontes energéticas usadas pela sociedade ocidental. O consumo de energia a nível mundial duplicou entre 1948 e 1970 e entre 1971 e 1991 aumentou aproximadamente 45%.



**Figura 4.1** – A: Consumo mundial de energia desde meados do século XIX até finais do Séc. XX. B: Percentagens relativas dos principais tipos de combustível utilizadas ao longo do tempo.

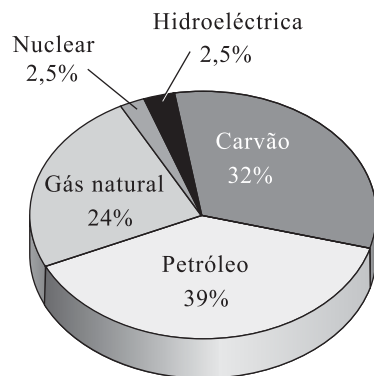
<sup>1</sup> Gj – Gigajoules – 10<sup>9</sup>J.

A manutenção do nosso estilo de vida requer uma enorme quantidade de energia. Embora a população dos países desenvolvidos constitua menos de ¼ do total mundial, estas nações consomem a maior parte dos recursos energéticos. Os norte-americanos e canadianos, por exemplo, constituem apenas 5% da população mundial mas utilizam ¼ da energia disponível. Em média, cada habitante dos E.U.A. e Canadá consome cerca de 300 Gj<sup>1</sup> (o equivalente a 60 barris de petróleo) por ano enquanto nos países mais pobres como a Etiópia ou o Nepal, cada pessoa gasta menos de 1 Gj/ano; isto significa que cada americano consome diariamente, em média, quase tanta energia como um etíope em um ano. De um modo geral há uma relação directa entre o consumo de energia e o nível de vida das populações (Fig. 4.2), embora haja excepções: muitos países europeus incluindo a Suécia, a Dinamarca e a Suíça têm elevados padrões de vida comparáveis aos dos E.U.A. mas usam apenas metade da energia gasta pelos americanos pois aqueles países investiram há muito em programas eficientes de conservação de energia; o Japão tem também uma taxa de consumo muito inferior ao que seria de esperar para o seu nível de industrialização e de vida porque, tendo poucos recursos energéticos, desenvolveu medidas conservativas de energia muito eficazes.



**Figura 4.2** – Correlação entre o consumo anual de energia e o produto interno bruto em alguns países.

A maior parte da energia (95%) utilizada pelo Homem (Fig. 4.3) provém da queima de combustíveis fósseis – carvão, petróleo e gás natural.



**Figura 4.3** – Contribuições relativas dos principais tipos energéticos para o consumo mundial, em 1989.

**Tabela 4.1** – Consumo de energia diário através do tempo.

Tempo	Consumo energético (kcal)	Fontes de energia principais	Utilização	Impacte ambiental
Há 1 Ma	2 000	Alimentação, músculo humano	Vida diária	Mínimo
Há 100 000 anos	4 000–5 000	Alimentação, fogo, utensílios simples	Aquecimento, cozinhar, caça	Local e a curto prazo: destruição da vegetação e redução da população animal
5 000 anos a.C.	12 000	Animais, produtos agrícolas	Transporte, cultivo, construção	Local e a longo prazo, especialmente nas áreas agrícolas: substituição da vegetação natural, alteração dos ambientes aquáticos, início da degradação do solo
Em 1400	26 000	Vento, água, carvão, moinhos de vento, azenhas	Operações mecânicas, bombagem de água, transporte, serração, moagem de cereais	Local e a longo prazo ou permanente: remoção da vegetação natural, poluição atmosférica nas áreas urbanas
Em 1800	50 000	Carvão, motores a vapor	Operações mecânicas, indústria, transporte	Local e regional: modificações permanentes da paisagem, poluição do ar e da água em áreas industriais
Em 1980	300 000	Combustíveis fósseis, energia nuclear, motores de combustão interna, electricidade	Operações mecânicas, indústria, transporte, desenvolvimento social e cultural	Local, regional e global: deterioração permanente e por vezes irreversível do ar, da água e do solo, chuva ácida, efeito de estufa, buraco do ozono

## 4.2 Combustíveis fósseis

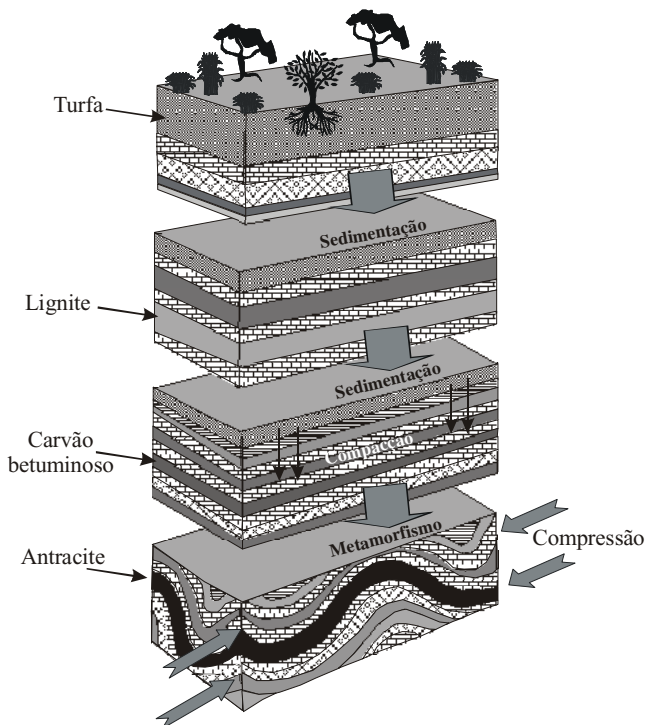
Os combustíveis fósseis são constituídos maioritariamente por proporções variáveis de carbono (82-87%) e hidrogénio (12-15%), embora incluam impurezas como o enxofre (em média 1,5%, que é usado no fabrico de ácido sulfúrico) e azoto (em média 0,1%). Ocorrem tipicamente como concentrações

localizadas de substâncias orgânicas em rochas sedimentares. Embora a quantidade total de matéria orgânica armazenada em rochas sedimentares seja muito inferior a 1% da matéria orgânica total da biosfera, a quantidade armazenada na litosfera durante os últimos 600 milhões de anos é muito grande. A natureza e o modo de ocorrência de cada combustível fóssil depende do sedimento hospedeiro, do tipo de matéria orgânica armazenada e das modificações que ocorreram posteriormente à sua acumulação, nomeadamente, a diagénese.

#### 4.2.1 *Turfa e carvão*

Os tecidos das plantas mortas, ricos em carboidratos, resinas, ceras etc., acumulam-se no solo. Nas florestas e pastagens, por exemplo, o oxigénio e a água meteórica infiltram-se e promovem a oxidação desta camada, que se decompõe, libertando  $\text{CO}_2$ ; o oxigénio suporta os organismos decompositores e a percolação de água através do solo remove os produtos de decomposição. Contudo, em alguns ambientes saturados de água como pântanos ou deltas estuarinos tropicais, onde a drenagem é fraca e a água estagnada pobre em oxigénio, a acumulação de manta morta vegetal excede a capacidade de remoção associada à decomposição aeróbia. Sucessivas gerações de plantas acumulam-se sobre as mais antigas e o oxigénio atmosférico não pode penetrar nos níveis mais profundos. Assim, a decomposição aeróbia é incompleta, deixando restos de plantas parcialmente decompostas formando um sedimento castanho a negro designado por turfa, com um conteúdo de carbono de cerca de 15%. Frequentemente, a turfa é depois coberta por materiais de natureza mineral depositados no pântano em períodos de submersão, devida a subida do nível do mar ou a migração lateral dos canais fluviais. Este soterramento comprime a turfa, que se liberta da água e outros voláteis ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ) – Fig. 4.4 – aumentando a proporção de carbono (incarbonização). A turfa é assim convertida em carvão, uma rocha sedimentar combustível essencialmente composta por carbono. Existem vários tipos de carvão<sup>2</sup> que se distinguem pela sua dureza, brilho, conteúdo em carbono e potencial calorífico (Tabela 4.2). A lenhite (ou lignite), um carvão castanho escuro, tem ainda elevado teor de voláteis e contém 35% de carbono; o carvão betuminoso tem baixo teor em voláteis, e a antracite quase não tem voláteis, apresentando o dobro do potencial calorífico da lenhite.

<sup>2</sup> Para complemento deste tópico vide “Carvões” no volume n.º 93, *Morfogénese e Sedimentogénese*.



**Figura 4.4** – Formação do carvão.

**Tabela 4.2** – Características da turfa e dos diferentes tipos de carvão.

Tipo	Cor	Componentes (%)			Valor energético (BTU*/kg)
		Água	Outros voláteis	Carbono	
Turfa	Castanho	75	10	15	6600-11000
Lignite	Castanho escuro	45	20	35	15400
Carvão betuminoso	Preto	5-15	20-30	55-75	26400
Antracite	Preto	4	1	95	30800

\* BTU – British thermal unit. 1BTU = 1054 J = 252 cal.

Em algumas partes do mundo, tais como a Irlanda, a Escócia e a Rússia, a turfa é ainda hoje usada como combustível de baixo grau energético, depois de seca, para cozinhar e aquecer habitações. Um terço das turfas mundiais ocorrem no Canadá, onde ocupam cerca de 12% da superfície do país.

A compactação de uma turfa para originar um carvão mais evoluído implica uma redução de espessura de aproximadamente 10x, o que significa que um leito de carvão com 3m corresponde a uma espessura original de turfa de 30 m. Actualmente a turfa acumula-se a uma taxa de 1m em cada 1000 anos e, a esta taxa, aquele leito representa cerca de 30 000 anos de sedimentação contínua. Embora a turfa se possa formar em condições subárticas, a espessura e extensão dos vastos depósitos de carvão conhecidos, sugere uma vegetação original

densa e luxuriante, em crescimento e multiplicação rápidos, mais compatíveis com clima tropical e subtropical. Tal implica que o clima global era mais quente e húmido quando as plantas que constituem os actuais depósitos de carvão originalmente se acumularam ou que os ambientes húmidos e pantanosos, nos quais a maior parte dos depósitos de carvão se formaram estavam todos localizados numa banda intertropical de cerca de 20° e centrada no equador. Provavelmente ambas as condições são verdadeiras e os depósitos de carvão que agora se encontram em regiões circumpolares e frias constituem uma das evidências da deriva continental. A turfa formou-se desde que as plantas colonizaram os continentes, há cerca de 450 milhões de anos. No entanto, os períodos de maior formação de carvão foram o Carbónico e o Pérmico (com início há 360 e 290 milhões de anos atrás). As grandes acumulações de carvão existentes na Europa e no NE da América formaram-se nesta altura, quando a vegetação parálisa era dominada por fetos gigantes, esfenófitas (plantas articuladas), lepidófitas (plantas com escamas no tronco) e gimnospérmicas. As sequências de carvão, argilito e calcário típicas daquelas acumulações indicam que o nível do mar subiu e desceu várias vezes durante o Carbónico; com o nível do mar alto, os pântanos costeiros eram inundados e acumularam-se sedimentos inorgânicos marinhos, que formaram mais tarde argilitos e calcários; com a descida do nível do mar, os pântanos e planícies aluviais tomavam lugar, e tornavam-se sede de acumulação do material que, mais tarde, se tornou carvão. Embora alguns dos depósitos de carvão de idade carbónica estejam hoje localizados em cadeias de montanhas como os Apalaches, marcam a localização de antigas zonas baixas, periodicamente inundadas por mares pouco profundos. Um segundo grande período de deposição de carvão foi o Cretácico (144 a 66.4 milhões de anos atrás), quando a temperatura média global atingiu os valores mais elevados da história da Terra. As plantas dos pântanos de então eram maioritariamente plantas com flor (angiospérmicas) semelhantes às que ali se encontram hoje. No entanto, existem ainda depósitos limitados de grafite em rochas muito antigas, o que sugere formação de carvão já no Pré-câmbrico associada a formas de vida diferentes.

O carvão encontra-se actualmente em formação em alguns pântanos extensos como os de Okefenokee, na Georgia e Florida, e Great Dismal, na Virgínia e Carolina do Norte, este último, um dos maiores pântanos actuais, com uma espessura média de 2m de turfa em formação. No entanto, serão necessários milhões de anos para que estas turfás produzam depósitos de carvão.

<sup>3</sup> Para complemento deste tópico vide “Hidrocarbonetos naturais” no volume n.º 93, *Morfogénese e Sedi-mentogénese*.

#### 4.2.2 *Petróleo e gás natural*<sup>3</sup>

A natureza do petróleo foi, no início da sua descoberta, como combustível, intrigante. Embora a sua composição indicasse uma origem orgânica, os

hidrocarbonetos constituintes do petróleo eram quimicamente diferentes dos hidratos de carbono, proteínas e outras moléculas orgânicas, principalmente na quantidade de oxigénio (Tabela 4.3). A investigação posterior mostrou que os hidrocarbonetos são efectivamente produzidos por transformação de diferentes tipos de matéria orgânica e que durante este processo o oxigénio é libertado, normalmente sob a forma de vapor de água. A origem orgânica do petróleo é suportada por dois tipos de evidências: possui propriedades ópticas apenas conhecidas em hidrocarbonetos derivados de matéria orgânica e contém azoto e outros compostos que se pensa serem originados na matéria viva.

Em sentido lato, o termo “petróleo” abrange todas as ocorrências ou concentrações naturais de hidrocarbonetos, qualquer que seja o estado físico em que se encontrem; em sentido mais restrito, o termo é usado para referir hidrocarbonetos que ocorrem no estado líquido, constituindo o produto que é designado por crude, petróleo bruto ou óleo; os hidrocarbonetos gasosos constituem o gás natural, que consiste maioritariamente em metano ( $\text{CH}_4$ ) contendo pequenas quantidades de propano ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ) e butano ( $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ) e os que se apresentam no estado sólido são conhecidos por betumes, asfaltos, parafinas, etc.

**Tabela 4.3** – Composição elementar média dos combustíveis fósseis (% de peso).

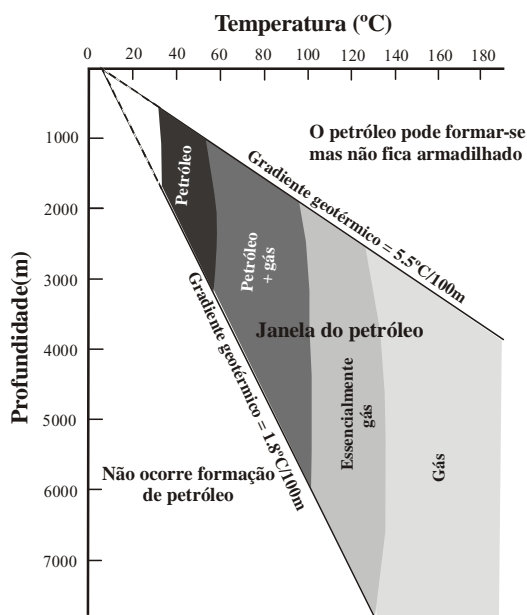
	Gás natural	Petróleo	Carvão
Carbono (C)	76	84,5	81
Hidrogénio (H)	24	13	5
Enxofre (S)	Traço – 0,2	1,5	3
Azoto (N)	0	0,5	1
Oxigénio (O)	0	0,5	10

A matéria orgânica produzida e erodida na superfície terrestre e finamente particulada é transportada para os oceanos pelos rios e pode ser depositada juntamente com vasa em águas costeiras pouco profundas. As plantas e animais marinhos (principalmente os que vivem na plataforma continental) adicionam mais matéria orgânica à vasa; são efectivamente o fitoplâncton (diatomáceas) e o zooplâncton (radiolários), as algas e bactérias, as principais fontes de matéria orgânica aprisionada nestes sedimentos. Uma vez mais, se os tecidos orgânicos estiverem expostos ao oxigénio, decompõem-se em  $\text{CO}_2$  e água, não deixando resíduo; no entanto, se a vasa rica em matéria orgânica for rapidamente coberta por sedimentos mais recentes, em ambiente pobre em oxigénio, a decomposição é mais lenta. Os estratos mais antigos e mais profundos ficam sujeitos a aumento de pressão devido aos sedimentos suprajacentes e a temperatura eleva-se devido ao calor interno da Terra. Estas condições, típicas da diagénese, convertem a

---

vasa em argilito e o material orgânico nela contido é transformado primeiro em querogénio (ou cerogénio) e depois em crude e gás natural através de uma cadeia longa e complexa de reacções químicas. Efectivamente, sob o efeito de condições moderadas de pressão e temperatura – fase diagenética – ocorre expulsão da água contida nos sedimentos, que tendem a ficar mais consolidados e originam-se diversas transformações – entre as quais recristalização, dissolução, neoformação de minerais – que podem modificar as características originais dos materiais; a matéria orgânica transforma-se no querogénio, material sólido de estrutura complexa, macromolecular. Com o aumento da profundidade e conseqüentemente da pressão e temperatura – fase da catagénesse – a composição e a textura dos sedimentos são pouco afectadas; no entanto, verifica-se ainda expulsão da água, diminuição da porosidade, permeabilidade e compactação das rochas; o querogénio sofre desmantelamento molecular e origina hidrocarbonetos líquidos e gasosos. Na fase de metagénesse e com valores de temperatura mais elevados (quer devido a subsidência quer a influência tectónica) os hidrocarbonetos líquidos já formados dão origem a compostos mais leves e mais simples.

As vasas orgânicas em transformação designam-se por “rocha-mãe” ou “rocha-fonte” do petróleo e as transformações químicas experimentadas pela fase orgânica até ao estado de hidrocarbonetos são conhecidas por maturação. A natureza original da matéria orgânica incorporada nos sedimentos condiciona a composição e a quantidade dos hidrocarbonetos produzidos. A conversão de matéria orgânica em petróleo e gás natural é possível dentro de um intervalo específico de valores de pressão e temperatura, mostrado na figura 4.5. Tipicamente, o petróleo forma-se no intervalo de temperaturas 50°C-100°C e o gás natural a temperaturas superiores. Se o gradiente geotérmico (modificação da temperatura com a profundidade) for baixo – inferior a 1,8°C/100m – a temperatura aumenta muito devagar e a maturação não ocorre. Se aquele gradiente se situar acima de 5,5°C/100m, a temperatura é relativamente elevada a profundidades baixas, a maturação ocorre mas os hidrocarbonetos escapam facilmente para a superfície e oxidam. A “janela” ideal de profundidade-temperatura na qual o petróleo e o gás natural se formam e podem ser “armadilhados” situa-se entre os dois gradientes geotérmicos citados.



**Figura 4.5** – A janela do petróleo é o resultado de uma combinação de profundidades e temperaturas dentro das quais o óleo e gás são formados e armadilhados.

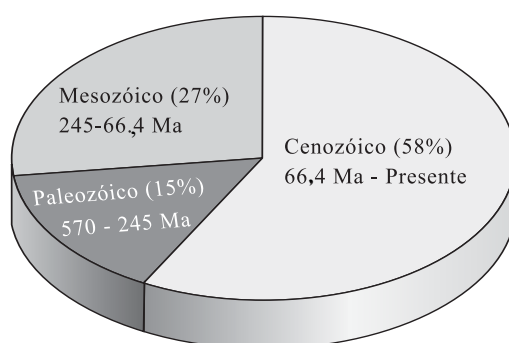
O petróleo e o gás natural formam-se actualmente em sedimentos vasosos orgânicos de muitas bacias marinhas e depressões costeiras mas os processos de maturação são extremamente lentos, muito mais lentos que as taxas correntes de consumo.

#### 4.2.2.1 Reservatórios de petróleo e de gás natural

Inicialmente o petróleo em maturação encontra-se disperso na vasa orgânica em diagénese para argilito, mas este meio não constitui um bom reservatório pois é relativamente impermeável e os hidrocarbonetos não podem ser recuperados. Um reservatório de petróleo forma-se, então, quando este flui e se concentra noutra rocha, permeável. Efectivamente, com o tempo, o gás e as pequenas gotículas de petróleo formadas na rocha-mãe coalescem e eventualmente são comprimidas pelas rochas suprajacentes, tendendo a migrar para mais próximo da superfície, onde a pressão é menor. Contudo, para que a migração ocorra, os hidrocarbonetos devem encontrar uma formação rochosa através da qual possam percolar facilmente ou seja, a migração requer rochas com alta porosidade e permeabilidade (sendo as mais comuns os arenitos e os calcários), que se designam por “rochas reservatório” ou “rochas armazém”. A atracção molecular entre o petróleo e os grãos minerais é mais fraca do que

entre a água e estes últimos. Assim, porque o petróleo e a água não se misturam, a maior parte desta permanece junto dos elementos de quartzo e de calcite que formam a trama sólida da rocha reservatório, enquanto o petróleo ocupa a parte central dos poros dos arenitos ou calcários. O petróleo e o gás natural são menos densos que a água (densidades médias de  $0,7\text{g/cm}^3$  e  $0,1\text{g/cm}^3$  respectivamente) e, por isso, os três fluidos estratificam por densidades no interior do reservatório.

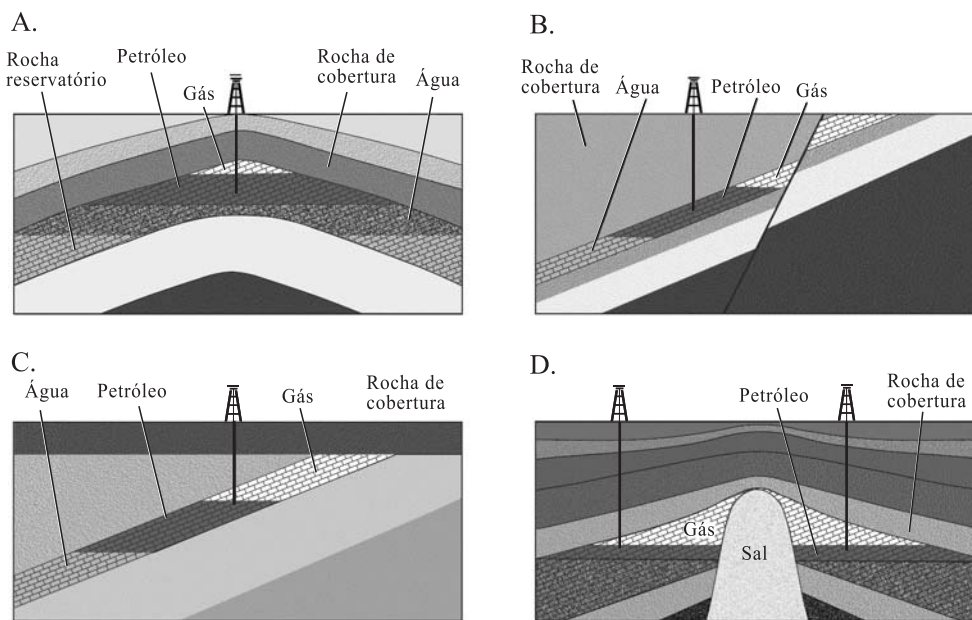
Muito do petróleo que se forma nos sedimentos pode viajar até à superfície, onde se perde. Não é, pois, surpresa, que as maiores concentrações de petróleo e gás natural por volume de sedimento se encontrem em rochas que não têm mais de 2,5 milhões de anos e que quase 60% dos hidrocarbonetos descobertos até hoje se associem a rochas do Cenozóico, com menos de 66,4 milhões de anos (Fig. 4.6). Isto não significa que as rochas mais antigas tenham produzido menos petróleo mas sim que o petróleo formado naquelas rochas teve muito mais tempo e oportunidade para escapar e para ser destruído por processos naturais. No entanto, pode acontecer que uma outra rocha, formação ou estrutura, com baixa porosidade e permeabilidade trave a migração ascendente do petróleo e gás natural e evite que estes alcancem a superfície. Tal barreira é chamada “rocha de cobertura”.



**Figura 4.6** – Produção de petróleo mundial (%) a partir de rochas com diferentes idades (Ma – milhões de anos).

#### 4.2.2.2 Armadilhas de petróleo e de gás natural

O dispositivo geológico que inclui uma rocha-mãe (fonte de material orgânico), uma rocha reservatório (que permite a migração e armazenamento dos hidrocarbonetos) e uma rocha de cobertura (barreira impermeável) é definida como uma armadilha de petróleo. Há vários tipos de armadilha de petróleo (Fig. 4.7).



**Figura 4.7** – Formação de armadilhas de petróleo. A e B – armadilhas estruturais. C – armadilha estratigráfica. D – Doma salino.

As armadilhas associadas a características geométricas ou estruturais das rochas, de natureza tectónica, tais como dobras ou falhas, são chamadas armadilhas estruturais. O caso mais comum é o de rochas impermeáveis dobradas em anticlinal, em que o petróleo migra para a charneira da dobra e fica ali aprisionado (Fig. 4.7A). No caso de falhas, se o movimento das rochas ao longo destas superfícies colocar uma rocha reservatório contra um tampão, cria-se uma armadilha eficiente (Fig. 4.7B).

As armadilhas estratigráficas (Fig. 4.7C) são criadas por diferenças nos estratos, resultando de dispositivos geométricos relacionados com discontinuidades, inconformidades ou discordâncias estratigráficas, por vezes angulares.

Os domas de sal (diapiros) constituem outro tipo de armadilha (Fig. 4.7D). O sal-gema (essencialmente constituído pelo mineral halite) é uma rocha evaporítica que se forma a partir da evaporação de água do mar ou de lagos salgados. Sedimentos marinhos de pequena profundidade, mais densos, podem depositar-se sobre os estratos de sal, que exibem baixa densidade; com o tempo e quando sujeito a esforço tectónico, o sal pode fluir para cima e penetrar através das rochas sobrejacentes, que dobram e falham, formando um depósito intrusivo com uma forma típica designado doma salino. O sal é altamente impermeável e se as rochas à volta do doma forem reservatórios de petróleo, este migrará ao longo das fracturas e ficará armadilhado contra o corpo salino.

Finalmente, os recifes de coral são excelentes armadilhas de petróleo e de gás natural. Após a morte dos corais, o recife torna-se uma estrutura altamente

---

porosa e permeável de calcário, podendo acomodar volumes enormes de hidrocarbonetos líquidos e gasosos. Se o maciço recifal estiver rodeado por uma unidade impermeável (de argila por exemplo), criar-se-á uma armadilha.

De modo geral, as armadilhas estruturais são mais comuns que as estratigráficas, diapíricas ou recifais. Os grandes reservatórios de petróleo da Arábia Saudita, Kuwait, Iraque e outros países do Médio Oriente, ocorrem principalmente em armadilhas estruturais, cuja deformação foi causada pela tectónica compressiva resultante da colisão entre as placas africana e asiática. Na realidade, as condições necessárias para a formação do petróleo são mais comuns ao longo de fronteiras de placas; no total, cerca de 68% das reservas de petróleo mundiais estão localizadas nas actuais fronteiras de placa convergentes ou onde estas existiram num passado geológico recente; as zonas de subducção são responsáveis por cerca de 5% do petróleo mundial e o restante é encontrado em actuais ou antigas fronteiras divergentes, onde tenha ocorrido deformação.

Tal como se formam em condições naturais, as armadilhas também podem ser naturalmente destruídas. Por exemplo, durante o levantamento (orogenia ou epirogenia) de cadeias de montanhas, a rocha de cobertura pode ser erodida e o petróleo escapa para a superfície e decompõe-se.

O petróleo bombeado do subsolo é um líquido negro viscoso, feito de muitos compostos químicos diferentes. As refinarias petrolíferas convertem-no em propano, gasolinas, lubrificantes e outros materiais úteis. Alguns dos compostos são usados no fabrico de plásticos, medicamentos, fertilizantes, asfalto, borracha, nylon e muitos outros produtos.

### 4.3 Recursos de petróleo e gás não convencionais

#### 4.3.1 *Argilitos e arenitos betuminosos*

Os argilitos e arenitos betuminosos são rochas sedimentares, de textura detrítica, contendo frequentemente níveis de dolomite, impregnadas de uma substância orgânica sólida do tipo do asfalto, constituída quase inteiramente por hidrocarbonetos densos, chamada betume (as temperaturas de maturação nunca atingiram os níveis necessários para quebrar completamente as moléculas orgânicas). Esta substância forma-se quando os compostos orgânicos em migração entram em contacto com a atmosfera, pedosfera e água subterrânea mas os detalhes da sua formação não são claros. Estes hidrocarbonetos têm viscosidade pelo menos 10 000 vezes maior que o petróleo líquido e por isso não podem ser recuperados pelos métodos convencionais. Os argilitos ou arenitos betuminosos são extraídos e a massa escavada é aquecida em condições controladas com vapor pressurizado para baixar a viscosidade do betume até

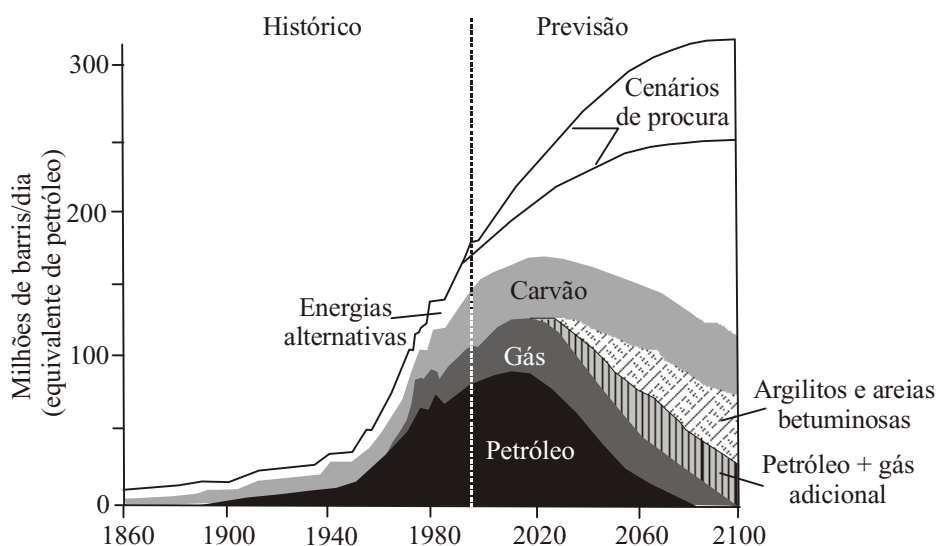
o liquefazer. A substância líquida é depurada para remoção do enxofre e de outras impurezas e é-lhe adicionado hidrogénio para a tornar crude sintético, que pode ser refinado.

### 4.3.2 Gás natural hidratado

O gás natural hidratado, uma ocorrência ainda mal conhecida, é formado por metano e água; trata-se de um material sólido semelhante a gelo, que pode ocorrer imediatamente abaixo do fundo do mar onde a profundidade da água exceda 300 a 450m e, em conjunto com o permafrost, em latitudes elevadas.

## 4.4 Disponibilidade dos combustíveis fósseis

A figura 4.8 mostra uma projecção possível da produção de energia mundial no séc. XXI, assumindo um aumento da contribuição dos recursos de petróleo e gás não convencionais, e um intervalo de procura, que pressupõe tendência para estabilização, devida à melhoria (plausível) da eficiência da energia consumida e a medidas de conservação. A estimativa da produção futura de carvão mantém as taxas correntes, devido ao facto deste combustível ser o menos aceitável do ponto de vista ambiental.



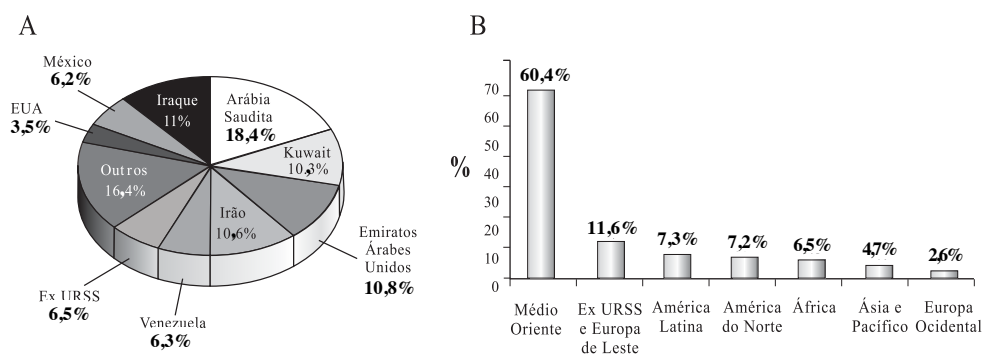
**Figura 4.8** – Projecção da produção de combustíveis fósseis, mantendo a produção de carvão limitada aos níveis actuais.

As previsões mais recentes apontam para um aumento global do consumo de energia de 75% em 2020 se a população continuar a aumentar ao ritmo actual e a qualidade de vida das populações melhorar.

#### 4.4.1 *Petróleo*

A estimativa da quantidade total de petróleo existente varia de autor para autor e pode atingir cerca de 4 mil milhões de barris<sup>4</sup>, sendo metade deste volume recuperável. No entanto, em 1994, as reservas mundiais eram calculadas em cerca de 1 milhar de milhões de barris, o suficiente para durar apenas 50 anos à taxa de consumo corrente de 20 mil milhões de barris/ano. Quanto petróleo permanece por descobrir, é uma questão que não tem resposta fácil. Ao contrário do carvão, cuja quantidade numa bacia sedimentar pode ser calculada com precisão, o volume de petróleo por descobrir apenas pode ser estimado com base na experiência dos últimos 100 anos. O ritmo a que novas jazidas petrolíferas foram descobertas diminuiu nos últimos anos pois as armadilhas mais prováveis e com maior potencial produtivo foram já prospectadas e exploradas: por cada metro de furo de prospecção encontra-se hoje cerca de metade do petróleo que se encontrava na década de 50, mas os especialistas estimam que poderão ser eventualmente descobertos ainda entre 1500 e 3000 milhares de milhões de barris de petróleo.

O maior produtor mundial de petróleo é a Arábia Saudita, com 17 mil milhões de barris/ano (Fig. 4.9). O Kuwait contribuía com cerca de 10% para a produção mundial até à invasão pelo Iraque, em 1990.



**Figura 4.9** – A: Reservas de petróleo recuperáveis em 1991 (%) e identificação dos maiores produtores deste combustível fóssil. B: Reservas de petróleo recuperáveis (em 1994) nas diversas regiões do Mundo.

Dos 600 mil milhões de barris produzidos, cerca de 465 mil milhões foram já consumidos. A disponibilidade futura de petróleo líquido tem sido e continua

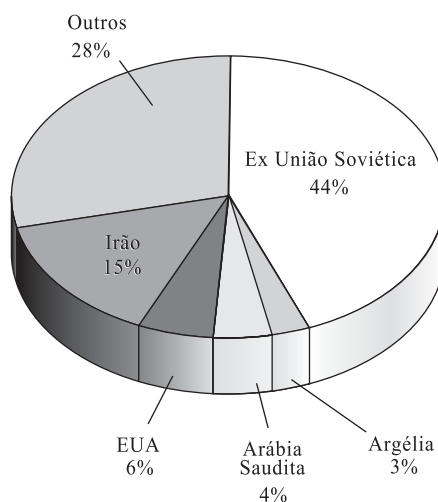
<sup>4</sup> Um barril de petróleo equivale a 159 l.

a ser matéria de controvérsia e, embora diferentes autores indiquem horizontes temporais de esgotamento diferentes, todos partilham a conclusão de que nos próximos 10 a 35 anos, a quantidade remanescente de petróleo será insuficiente para suprir a procura. O geólogo M. King Hubbert afirmou ser para ele difícil decidir o que é mais espantoso: se o facto de “serem necessários 600 milhões de anos para formar petróleo na Terra” ou o facto de “bastarem 300 anos para o consumir completamente”.

#### 4.4.2 Gás natural

O consumo do gás natural tende a aumentar devido à sua popularidade como o combustível fóssil ambientalmente mais favorável e será ainda mais procurado se a legislação ambiental se tornar mais restritiva. Só desde os anos 80, a produção de gás aumentou de 30% no mundo inteiro.

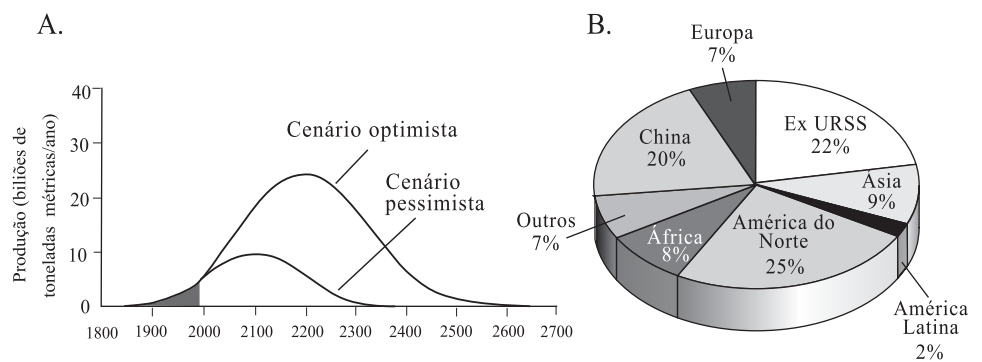
Os recursos de gás natural recuperáveis a nível mundial totalizam cerca de 280000 milhares de milhões de litros e corresponde a cerca de 80% da energia produzida com as reservas de petróleo. As reservas são calculadas em 91000 milhares de milhões de litros (equivalente a cerca de 83 000 milhões de toneladas de petróleo) e a produção mundial anual é aproximadamente de 1500 milhares de milhões de litros. Uma vez que as taxas de consumo de gás natural são cerca de metade das do petróleo, aquelas reservas asseguram cerca de 60 anos de fornecimento. O território da ex-União Soviética alberga 44% das reservas de gás natural conhecidas (principalmente na Sibéria e nas Repúblicas da Ásia Central) – Fig. 4.10 – que são os maiores fornecedores da Europa ocidental e de leste.



**Figura 4.10** – Reservas de gás natural (%), em 1990.

### 4.4.3 Carvão

Os recursos totais de carvão são estimados em 10 milhares de milhões de toneladas o que, à taxa de consumo actual, satisfaria vários milhares de anos de abastecimento; as reservas, dez vezes maiores que as de petróleo e gás natural, durarão cerca de 200 anos, prevendo-se um aumento da disponibilidade deste combustível até pelo menos ao ano 2200 (Fig. 4.11A). Contudo, sendo um combustível sólido, o carvão, não pode ser usado directamente nos motores de combustão convencionais, na maior parte dos fornos domésticos e em muitas indústrias. Uma solução para este problema é a sua conversão em combustível líquido ou gasoso, o que já foi conseguido do ponto de vista técnico; no entanto, actualmente, é um processo caro, não competitivo, que produz muitos poluentes atmosféricos e requer grande quantidade de água.



**Figura 4.11** – A: Historial e previsão da produção mundial de carvão com base em dois cenários possíveis. B: Reservas de carvão (%). Em “outros” inclui-se a Europa de leste (excepto a ex-União Soviética).

A América do Norte possui  $\frac{1}{4}$  das reservas mundiais de carvão, seguida em importância pela ex União Soviética e pela China (Fig. 4.11B); comparativamente, a Europa possui grandes quantidades de carvão, ao contrário da América Latina. Pensa-se que na Antártida existam grandes depósitos de carvão mas a sua extracção seria difícil, cara e ecologicamente danosa.

### 4.4.4 Recursos não convencionais

Nos E.U.A., os argilitos betuminosos contêm energia potencial equivalente a 2-5 milhares de milhões de barris de petróleo, o suficiente para abastecer aquela nação durante 400-900 anos, às taxas correntes de consumo. Contudo, a quantidade de energia consumida na sua extracção e conversão do querogénio em óleo excede, no caso dos argilitos betuminosos de baixo grau energético, a que pode ser gerada pelos hidrocarbonetos recuperáveis pelo que, enquanto

---

a tecnologia não evoluir, estes depósitos não serão usados como fonte combustível. O petróleo refinado a partir de argilitos betuminosos de elevado grau energético forneceriam aquele país durante cerca de 75 anos, se as taxas de consumo permanecessem semelhantes às actuais. Os restantes depósitos mundiais não são tão ricos e, por isso, a situação global não é promissora.

A exploração e processamento de areias betuminosas requer cerca de metade da energia que o produto final pode fornecer, razão pela qual são pouco utilizadas.

A energia que poderá eventualmente ser obtida a partir do gás natural hidratado é estimada no dobro da derivada de todo o petróleo, gás natural e carvão existentes actualmente. É, portanto, uma fonte potencial de energia futura importante. No entanto, os problemas de exploração e produção são grandes e não dispomos ainda de tecnologias adequadas para a sua exploração rentável.

#### 4.4.5 *Exploração secundária das jazidas de petróleo*

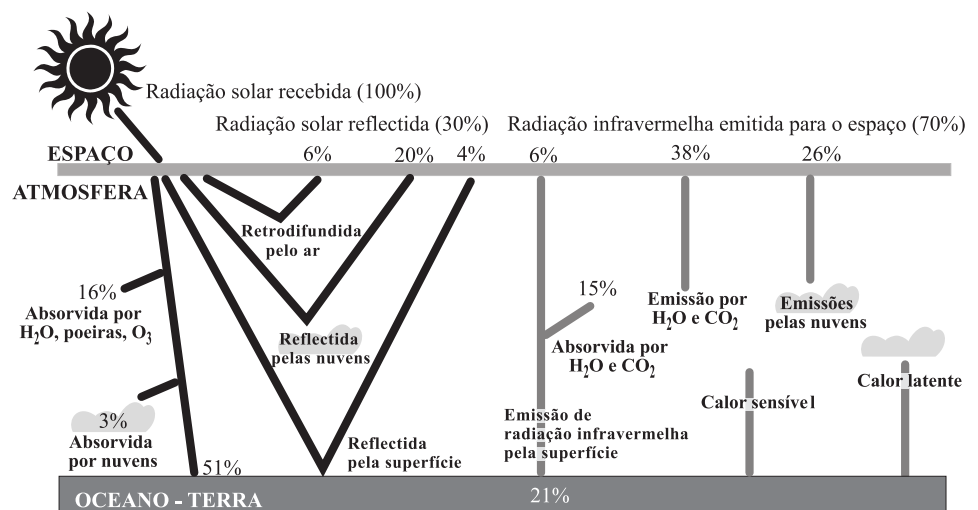
À ascensão do petróleo ao longo de um furo pela pressão interna do reservatório ou por bombagem, chama-se recuperação primária. Quando a rocha reservatório se torna substancialmente depauperada e a pressão no furo decresce significativamente, o poço considera-se seco; nestas circunstâncias, mais de metade do petróleo armazenado permanece no reservatório pois os métodos convencionais de bombagem não conseguem recuperá-lo. Uma das técnicas utilizadas para extrair estes volumes, é a inundação do reservatório com água, a fim de aumentar a pressão e forçar a ascensão dos hidrocarbonetos remanescentes – processo que se designa por recuperação secundária. O estágio final, recuperação terciária, envolve a injeção de detergente, CO<sub>2</sub> ou gel polimerizado no reservatório ou ainda de vapor de água a alta pressão; os primeiros transportam, solubilizam ou mobilizam o óleo, sendo a mistura posteriormente recuperada e os hidrocarbonetos separados dos produtos injectados, que são reciclados; o vapor aquece o petróleo, aumentando a sua capacidade de fluir para o poço, mas é necessária uma grande quantidade de energia para gerar e manter a injeção de vapor, o que torna este tipo de extracção actualmente não rentável.

### 4.5 **Problemas ambientais resultantes da produção e utilização de combustíveis fósseis**

Todos os estádios do ciclo energético dos combustíveis fósseis, desde a sua extracção à queima, são potenciais causadores de problemas ambientais, alguns

<sup>5</sup> Os principais gases de estufa são: vapor de água (H<sub>2</sub>O), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), metano (CH<sub>4</sub>), clorofluorcarbonetos (CFC), hidrofluorcarbonetos (HFC), perfluorcarbonetos (PFC) e ainda hexafluoreto de enxofre (SF<sub>6</sub>), sendo estes quatro últimos de origem sintética.

específicos e outros comuns. De entre estes últimos, ressalta a libertação de CO<sub>2</sub> para a atmosfera devido à queima destes combustíveis, o qual é um dos principais gases de efeito de estufa<sup>5</sup>. O efeito de estufa consiste na retenção de calor junto à superfície da Terra em virtude da “opacidade” dos gases de estufa que se concentram na baixa atmosfera e que regulam o seu equilíbrio térmico (Fig. 4.12). Este efeito possibilita a manutenção de uma temperatura média global perto da superfície do planeta da ordem de 15°C, que seria de -18°C na sua ausência, inviabilizando a Vida como a conhecemos actualmente. Assim, aquilo que vulgarmente se refere como efeito de estufa associado à actividade antrópica é, na verdade, a potenciação de um fenómeno presente através da história geológica do Planeta e crucial para a biosfera. O aumento da concentração dos gases com efeito de estufa na atmosfera provoca um aumento da temperatura e, conseqüentemente, perturba o clima global. Durante o século XX a temperatura média superficial aumentou de 0,6±0,2°C, provavelmente a maior variação positiva ocorrida nos últimos 1000 anos. As projecções realizadas pelo IPCC (Intergovernmental Panel for Climatic Change) para o período 2000-2100, com base em diferentes cenários de evolução económica, populacional e tecnológica apontam para aumentos de 90 a 250% (relativamente a 1750) na concentração atmosférica de CO<sub>2</sub> e, com base nestas estimativas, prevê-se que a temperatura média global do Planeta aumente de 1,4 a 5,8°C naquele intervalo de tempo. Esta modificação tem, naturalmente, inúmeras implicações como por exemplo no domínio da agricultura, onde surgirão mudanças nos padrões de uso do solo, na saúde humana e na subida do nível médio do mar, devida principalmente à expansão térmica do oceano e à fusão dos glaciares de montanha.



**Figura 4.12** – Balanço energético da radiação recebida e emitida pela Terra.

## Actividade 4.1

Estime o conteúdo de carbono na atmosfera (em toneladas) correspondente à concentração de 360 ppm de  $\text{CO}_2$  (valor em 1990). Assuma uma massa total de ar de  $5,1 \times 10^{18} \text{kg}$ . A densidade do ar a valores padrão de pressão e temperatura (SPT,  $0^\circ\text{C}$  e 1 atm) é de  $1,29 \text{kg/m}^3$ .

$$\left( \text{mg} / \text{m}^3 = \frac{\text{ppm} \times \text{peso molecular}}{22,4} \right)$$

Resultado:  $762 \times 10^9 \text{tonC}$ .

## Actividade 4.2

A concentração de  $\text{CO}_2$  em 1965 era de 320 ppm e em 1990 de 355 ppm. Se este crescimento ocorrer de forma exponencial, qual a taxa de crescimento correspondente? A essa taxa exponencial de crescimento, em que ano as concentrações atmosféricas serão duplas dos níveis existentes antes da industrialização (280 ppm)?

Resultado: 0,415%/ano; 2100.

### 4.5.1 *Extracção e queima de carvão*

O carvão é extraído em explorações superficiais e subterrâneas, e ambas têm vantagens e desvantagens ambientais. As minas subterrâneas não perturbam directamente a superfície topográfica, mas são mais caras e menos eficientes que a exploração a céu aberto pois cerca de metade do carvão tem de ser deixado como suporte de galerias. Contudo, a mineração subterrânea envolve o perigo de colapso de galerias abandonadas, que ocasionalmente afecta infra-estruturas superficiais construídas (habitações, estradas, ...); as minas estão igualmente sujeitas a riscos de inundação, incêndio e à acumulação de gases como o monóxido de carbono,  $\text{CO}_2$ , metano e ácido sulfídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ), que são explosivos quando combinados com o oxigénio e/ou venenosos. A laboração em minas de carvão é causa de muitas mortes e doenças respiratórias (como a “doença dos pulmões negros”<sup>6</sup>).

Os estéreis resultantes da laboração, são habitualmente depositados nas imediações, formando acumulações não vegetadas (escombreyras) que são presa fácil da erosão e podem dar origem a deslizamentos; as vasas assim produzidas e arrastadas pela escorrência superficial causam assoreamento dos rios próximos e destroem os habitats aquáticos. As explorações a céu aberto tornam a terra imprópria para outros usos, conduzem à instabilidade de vertentes e à erosão dos solos. Em muitos países, a legislação obriga as companhias

<sup>6</sup> A doença dos pulmões negros é causada pela inalação de partículas microscópicas de pó de carvão. Para a evitar, os mineiros deveriam usar máscaras filtrantes mas o seu uso não é obrigatório. Como os efeitos da inalação do pó de carvão só aparecem ao fim de alguns anos, os mineiros optam por não usar este equipamento. Nos E.U.A., as estimativas governamentais apontam para a morte de 4000 mineiros americanos/ano devido a esta doença, muitos após a reforma.

mineiras a efectuar e executar um plano de recuperação ambiental das áreas exploradas, mas nem sempre a lei é cumprida.

O carvão contém normalmente enxofre na forma de pirite ( $\text{FeS}_2$ ), que, quando exposta ao ar, reage com a água e o oxigénio para produzir óxidos e hidróxidos de ferro e ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ). Se o controle de poluição não for adequado, este ácido drena e contamina a água subterrânea e os rios, acidificando as suas águas, adicionando-lhe metais e afectando os ecossistemas. As plantas aquáticas e os animais são sensíveis à acidez do seu habitat e morrem se o pH descer abaixo dos seus níveis de tolerância. A este tipo de poluição chama-se, como já referimos antes, drenagem ácida da mina. Também, quando o carvão é queimado, o enxofre nele contido reage para formar sulfureto de hidrogénio, gás que é libertado e convertido em ácido sulfúrico pelo oxigénio e humidade atmosféricos, originando chuvas ácidas. A queima do carvão liberta ainda elementos radioactivos e muitos outros metais tóxicos; efectivamente, as plantas absorvem e incorporam nos seus tecidos uma vasta gama de elementos em concentrações muito baixas, da ordem dos ppm ou ppb, como o urânio, tório, chumbo, cádmio, mercúrio, rubídio, tálio e zinco – que são concentrados no processo de incarbonização da matéria vegetal; estes elementos não são destruídos quando o carvão é queimado mas libertados como gases ou concentrados nas cinzas. A combustão do carvão é responsável por cerca de 25% da poluição atmosférica por mercúrio nos E. U. A., país onde as centrais termoeléctricas a carvão libertam cerca de 2000 toneladas por ano de urânio e tório, levando a que este combustível fóssil seja classificado como resíduo radioactivo de baixo grau.

Quando o carvão se forma, actua como sumidouro de carbono que, de outro modo, teria muito provavelmente tomado a forma de  $\text{CO}_2$  na atmosfera. Quando se explora e queima o carvão, liberta-se mais  $\text{CO}_2$  do que o que pode ser absorvido pela Terra no mesmo intervalo de tempo. Este excesso pode ter efeitos drásticos nas temperaturas globais, como já referimos, e nos sistemas de suporte da vida no nosso planeta. O carvão é o combustível fóssil que mais contribui para a poluição atmosférica, libertando  $25,2 \times 10^6$  ton C/quad<sup>7</sup> de energia produzido (comparativamente ao petróleo que liberta  $20,8 \times 10^6$  ton/quad e ao gás natural que emite  $14,5 \times 10^6$  ton C/quad).

<sup>7</sup> 1 quad = 1 quadrilhão de BTU =  $1 \times 10^{15}$  BTU =  $1,055 \times 10^{18}$  J.

### Actividade 4.3

Suponha que o consumo de energia duplica em 50 anos, e que nessa altura aquela resulta da queima de carvão (50%), petróleo (13%) e gás natural (11%) (os restantes 26% são obtidos com energia hidroeléctrica, nuclear e solar). Assuma emissões iniciais de carbono de 5,5Gt/ano, correspondentes a uma quantidade de energia de 300 quad. Assumindo o modelo exponencial, estime a taxa anual de crescimento das emissões de carbono, por unidade de energia.

Resultado: -0,16%/ano.

#### 4.5.2 *Extracção, transporte e processamento de petróleo e gás natural*

A utilização do petróleo tem muitas vantagens: a sua extracção e transporte são relativamente baratos, requer escasso processamento para diversos usos (por exemplo como combustível para motores). Os problemas ambientais característicos das pequenas explorações de petróleo em terra, são relativamente pequenos. No entanto, à medida que estas reservas, mais acessíveis, se esgotaram, as companhias petrolíferas iniciaram e desenvolveram exploração em ambientes mais sensíveis, como os fundos oceânicos ou a tundra ártica. Esta exploração é efectuada em plataformas, onde actuam os instrumentos de furação e, apesar de todas as precauções, ocorrem acidentes durante esta operação e a fase de extracção: a rotura das bombas e o excesso de pressão podem originar incêndios e derrame de petróleo em larga escala, que destroem completamente os ecossistemas marinhos. Também as lamas utilizadas para arrefecimento das brocas de perfuração, são habitualmente depositadas na superfície e podem conduzir à contaminação do solo e da água subterrânea.

O petróleo e o gás natural têm uma característica em comum com a água subterrânea: a sua presença nos poros das rochas fornece geralmente algum suporte para a pressão exercida pela coluna sedimentar suprajacente e a exploração dos hidrocarbonetos (tal como acontece com a sobreexploração da água subterrânea) pode conduzir à subsidência da superfície topográfica. Foi o que aconteceu com a extracção de petróleo na área portuária de Long Beach, perto de Los Angeles: entre 1940 e 1994 a superfície subsidiu cerca de 9m na área central do reservatório; as tentativas efectuadas a partir de 1958 para reverter a situação, através da injeção de grandes quantidades de água nas rochas reservatório para substituição do petróleo removido e aumento da pressão dos fluidos, tiveram resultados muito limitados (cerca de 15% de recuperação em 1963). No Japão, a zona costeira da cidade portuária de Niigata subsidiu devido à extracção de gás natural, numa área de 32 x 20km; a maior subsidência concentrou-se na faixa litoral de ambos os lados da cidade, com alguns locais a afundar cerca de 1,5m.

O petróleo precisa de ser transportado a longas distâncias, aumentando assim a probabilidade de ocorrência de derrames. No entanto, é mais fácil de transportar que o gás natural, o qual necessita ser liquefeito antes de ser transportado<sup>8</sup> (o que reduz a sua rentabilidade económica) e daí a sua maior expansão. Em termos estatísticos globais, a indústria de petróleo tem um excelente registo de segurança no que respeita ao transporte e distribuição, pois apenas uma pequena fracção da quantidade total do petróleo transportado é acidentalmente libertado para o ambiente. No entanto, quando ocorre um derrame, os efeitos podem e costumam ser catastróficos. O petróleo explorado na costa norte do Alasca é conduzido através de um “pipeline” até ao litoral sul (Valdez) onde é bombeado para navios-tanque que o transportam para as

<sup>8</sup> O processo mais fácil e económico de transportar o gás natural é através de pipelines. Este gás pode ainda viajar em tanques de navios refrigerados, mas o perigo de explosão não é negligenciável. Além disso, um navio-tanque pode transportar apenas cerca de metade da energia contida num navio-tanque de petróleo com a mesma dimensão.

<sup>9</sup> Acumulam-se evidências de que é preferível deixar a natureza actuar na limpeza dos derramamentos de crude pois este degrada-se através da acção do sol e de microorganismos. Aquando do acidente com o Exxon Valdez, foi usada água quente sob pressão para limpeza de algumas das praias afectadas e anos mais tarde verificou-se que estas continuavam azóicas enquanto as praias deixadas sem tratamento recuperaram naturalmente.

refinarias. Em Março de 1989, o super-petroleiro Exxon Valdez encalhou perto desta localidade, originando um dos maiores desastres ecológicos de sempre; o derrame de 260 000 barris – cerca de 40 milhões de litros – de crude, afectou 5 000km de linha de costa e matou milhares de aves e mamíferos marinhos; causou prejuízos temporários importantes nas indústrias de pesca e do turismo local e não se sabe ainda quanto tempo será necessário à recuperação total do ecossistema<sup>9</sup>.

O crude deve ser refinado e destilado para produzir gasolina, gasóleo, óleo, querosene e propano, entre outros derivados. Cerca de 40% do petróleo é usado para o fabrico de produtos não energéticos – plásticos, químicos, medicamentos e vestuário. As refinarias cobrem áreas relativamente extensas e podem processar diariamente milhares de barris de petróleo. Cada estádio de refinação é uma fonte potencial de poluição atmosférica e, apesar das refinarias usarem equipamentos de controle de poluição, esta tecnologia nunca é completamente eficiente e assim, o enxofre e outros químicos tóxicos e carcinogénicos escapam para a atmosfera. Da refinação de petróleo resulta também grandes volumes de líquidos tóxicos, os quais são drenados muitas vezes para as linhas de água mais próximas ou armazenados em poços de “rejeitos”, constituindo fontes potenciais de poluição das águas superficial e subterrânea.

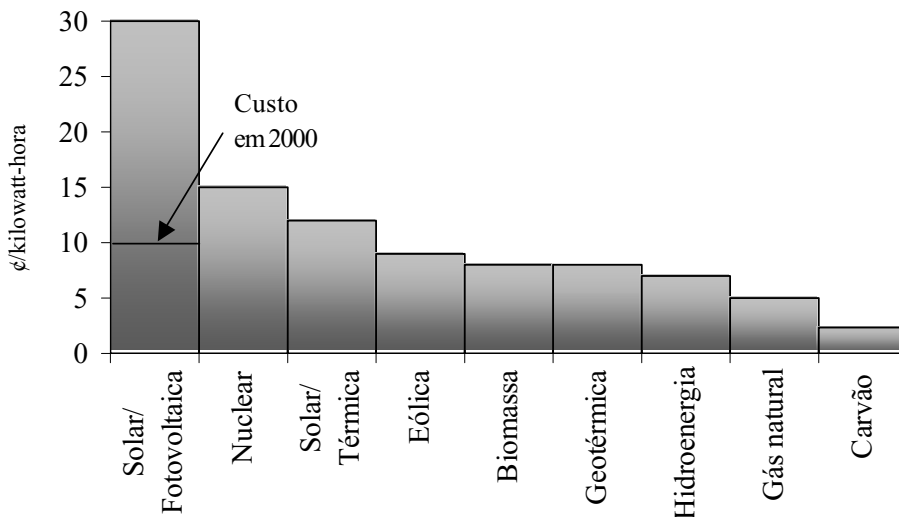
#### 4.5.3 *Extracção e processamento de argilitos e arenitos betuminosos*

A extracção dos argilitos e arenitos betuminosos é dispendiosa, podendo ser efectuada em minas subterrâneas ou a céu aberto. Em ambos os casos, podem observar-se problemas ambientais similares aos criados pelas minas de carvão e que estão relacionados com a poluição da água e do ar, mas existem questões adicionais específicas destes materiais.

Quando os argilitos betuminosos são partidos em pequenos pedaços e expostos ao ar durante o processamento, absorvem água e dilatam; assim, o volume da rocha aumenta, mesmo após remoção do hidrocarboneto. Os argilitos expandidos estéreis, são depois amontoados em escombreliras que, além de serem facilmente erodidas, têm um enorme impacto visual. Outro problema ambiental inerente ao processamento de argilitos betuminosos é o consumo de água: são necessários aproximadamente dois barris de água para produzir um barril de petróleo a partir desta matéria-prima, o que pode causar problemas acrescidos principalmente nas regiões de clima semi-árido. Por outro lado, os hidrocarbonetos destas rochas contêm enxofre e metais pesados em teores superiores aos do petróleo convencional, o que conduz à multiplicação cada vez mais frequente, de lagos de resíduos tóxicos com elevado potencial poluente.

## 4.6 Energias alternativas

Se compararmos a evolução do consumo de combustíveis fósseis com as quantidades remanescentes, concluiremos que apenas o carvão, o mais abundante combustível fóssil, pode suprir a procura mundial a longo prazo. Será assim necessário descobrir novas jazidas, melhorar as tecnologias de queima, inovar métodos de extracção, aumentar a exploração dos recursos não convencionais e desenvolver energias alternativas. Algumas das fontes energéticas são renováveis, estando disponíveis enquanto o sol brilhar – a energia solar, a hidroenergia, a energia eólica, a energia contida na biomassa – ou enquanto o interior da Terra for suficientemente quente – energia geotérmica. Outras são não renováveis, como a energia nuclear. A figura 4.13 mostra que as energias alternativas renováveis são já hoje mais económicas do que a energia nuclear, para efeitos de produção de electricidade.



**Figura 4.13** – Custo da geração de electricidade em 0,01 US\$ (kilowatt-hora) em 1994 por diferentes tecnologias.

### 4.6.1 Energias renováveis

#### 4.6.1.1 Energia solar

A Terra intercepta apenas uma pequena fracção da energia irradiada pelo Sol, pois a maior parte dela é reflectida para o espaço exterior. A fracção interceptada dissipa-se de várias formas – aquecimento da atmosfera, das massas de terra e dos oceanos, geração de correntes oceânicas e ventos, evaporação e manutenção do ciclo hidrológico, etc.. A energia solar que atinge a totalidade da superfície terrestre excede largamente as necessidades energéticas actuais e futuras.

---

Efectivamente, a maior fonte energética do nosso planeta é a radiação electromagnética proveniente do sol, que fornece cada ano  $4 \times 10^{24}$ J ( $173\,000 \times 10^{12}$ watt) e perfaz 99,99% do fluxo energético da Terra. A energia solar está, em última análise, na origem de quase todas as outras fontes energéticas, e encontra-se indirectamente armazenada na madeira, no carvão, petróleo e gás natural, na água e ar (vento) em movimento. Contudo, quando referimos a energia solar, restringimos vulgarmente o conceito aos diversos modos de a capturar directamente para consumo imediato.

Estima-se que o Sol continue a brilhar nos próximos 5 mil milhões de anos, o que significa, na prática, tratar-se de uma fonte inesgotável. A luz solar não necessita de mineração, furação ou bombagem; é gratuita, não é controlável e não é objecto de embargo nem de outras disfunções de natureza política. O uso de energia solar é essencialmente livre de poluição, não produz resíduos sólidos perigosos nem poluição da água, do ar ou sonora; na maioria das aplicações correntes, a energia solar é usada “in loco”, evitando assim perdas de transmissão. Estas características convertem-na numa opção atractiva mas ainda existem limitações ao seu uso, no presente e no futuro imediato: é um recurso muito disperso e variável em intensidade, quer no espaço, quer no tempo.

A energia solar é actualmente utilizada em sistemas de aquecimento activos ou passivos e para produzir electricidade.

Os sistemas passivos consistem em dispositivos de aquecimento de água em edifícios desenhados e orientados para maximizar a captura de energia solar e são construídos com materiais capazes de armazenamento rápido de calor mas que o libertam devagar. Os sistemas solares activos utilizam circulação forçada de água, ar ou outros fluidos condutores aquecidos pela radiação solar colectada em painéis.

A produção directa de electricidade a partir da luz do Sol é conseguida através de células fotovoltaicas (também designadas “células solares”) fabricadas com silício, um elemento semiconductor (assim designado porque a altas temperaturas conduz electricidade como os metais, mas a baixa temperatura tem condutividade virtualmente nula) ao qual são adicionadas quantidades ínfimas de gálio e cádmio. Quando estas células são expostas à radiação solar, os electrões exteriores do material semi-condutor são excitados e fluem livremente, criando corrente eléctrica. Cada célula produz uma pequena quantidade de energia, pelo que são agrupadas para formar um painel solar. Durante muitos anos, estes painéis constituíram a principal fonte energética dos satélites e em algumas áreas remotas na Terra. Uma alternativa para gerar electricidade baseia-se na concentração de energia solar sob a forma de calor em painéis especialmente desenhados, onde a água em circulação controlada é transformada em vapor que, por sua vez, activa turbinas geradoras de electricidade. Uma central de energia solar requer cerca de  $1\text{km}^2$  de superfície colectora de radiação por cada 20-60 milhões de watt de electricidade gerada.

O uso da energia solar é, como já foi dito, ambientalmente benigno. Porém, tal não acontece com o fabrico de componentes e a construção de instalações para produção de electricidade. O gálio, cádmio e arsénio, utilizados nas células fotovoltaicas mais eficientes, são potencialmente tóxicos, com graves riscos para a saúde humana nas fases de exploração e de manufactura de semicondutores. Uma central de energia eléctrica solar com uma produção de 100 megawatt necessita para as infra-estruturas, de pelo menos 30 000 a 40 000 toneladas de aço, 5 000 toneladas de vidro e 200 000 toneladas de cimento, em contraste com as cerca de 5 000 toneladas de aço e 50 000 toneladas de cimento necessárias a uma central nuclear ou a uma unidade a carvão, que seria construída com muito menos matéria prima. A existência de centrais solares pode alterar os padrões de evaporação e o regime de escoamento superficial, com impacte potencialmente crítico em áreas desérticas, precisamente as mais favoráveis para tais instalações, do ponto de vista da intensidade e permanência da luz solar incidente. A sua construção pode igualmente perturbar a superfície terrestre e acelerar a erosão. Uma grande limitação ao uso das células solares é o seu custo, várias vezes superior por unidade de energia ao do combustível nuclear ou dos hidrocarbonetos fósseis (5 vezes em relação ao carvão); este custo deve-se principalmente a questões tecnológicas (baixa eficiência – cerca de 20%)<sup>10</sup> e a uma questão de escala – a indústria não é suficientemente grande para aproveitar a economia de produção em massa. O armazenamento de electricidade solar é também uma questão complexa, que pode ser resolvida com baterias em espaços relativamente pequenos mas não em larga escala.

O aquecimento parece, pois, ser o sector de consumo para o qual a energia solar pode contribuir mais significativamente, com impacto ambiental mínimo. Neste caso, as necessidades de espaço e em recursos minerais são comparáveis às requeridas por tecnologias convencionais; disponibilidade de energia (abundante) e o custo (gratuita) aliadas à inexistência de poluição da operação da transformação energética, constituem benefícios substanciais.

#### 4.6.1.2 Energia geotérmica

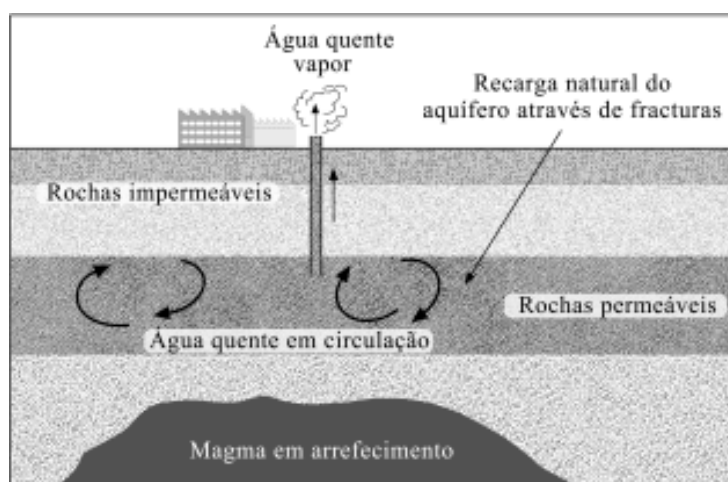
O interior da Terra contém uma grande quantidade de calor, maioritariamente originado aquando da sua formação e diferenciação e algum continuamente gerado por desintegração de elementos radioactivos. Esta energia é transmitida para a superfície a uma taxa tão baixa que, em circunstâncias normais, nem a notamos e, obviamente, não podemos usá-la. O aproveitamento integral do fluxo de calor oriundo do interior da Terra – 0,06 watt/m<sup>2</sup> em média<sup>11</sup> – durante um ano em 1 m<sup>2</sup> de superfície, seria apenas suficiente para ferver 7,5 l de água. Contudo, a quantidade de calor armazenada nas rochas em profundidade tem

<sup>10</sup> Isto significa que em áreas onde a radiação incidente é da ordem de 250 watt/m<sup>2</sup>, se podem gerar, no máximo 50 watts/m<sup>2</sup>. Assim, para manter uma lâmpada de 100 watt são necessários pelo menos 2m<sup>2</sup> de colectores. Uma central eléctrica de 100 Megawatt requereria 2km<sup>2</sup> de colectores, o que representa um grande investimento e consumo de recursos minerais para o seu fabrico e de superfície para a sua instalação.

<sup>11</sup> Embora o fluxo de calor possa ser substancialmente maior em áreas vulcânicas jovens, este número é pequeno quando comparado com os cerca de 1200 watt/m<sup>2</sup> directamente provenientes do Sol.

potencial energético estimado em cerca de 4 vezes o dos combustíveis fósseis, constituindo um recurso geotérmico.

Ao ascender na crosta a partir do manto, o magma transporta calor para perto da superfície, o qual pode aquecer a água subterrânea que circula nas proximidades (Fig. 4.14) – esta é a base para a geração de energia geotérmica. As águas assim aquecidas podem migrar para a superfície originando “geysers” e fontes quentes, que assinalam a existência de uma fonte de calor pouco profunda. Os fluxos de calor mais elevados e a actividade magmática associam-se e ocorrem em regra em fronteiras de placas. Em 1991, trinta e nove países utilizavam energia geotérmica (entre os quais Portugal, nos Açores), 2/3 dos quais se situam ao longo de fronteiras de placa activas (Tabela 4.4).



**Figura 4.14** – Representação esquemática da formação de energia geotérmica.

As aplicações da energia geotérmica dependem muito do fluxo calórico e do contexto geológico local. Em alguns casos, a água subterrânea é naturalmente aquecida e recuperada a 50-90°C, temperatura insuficiente para a vaporizar mas perfeitamente compatível com a utilização no aquecimento de edifícios, como acontece na Islândia e alguns locais da ex União Soviética. Noutras regiões, a água subterrânea ocorre sob a forma de vapor, que é conduzido e turbinado para gerar electricidade. Actualmente, cerca de 2/3 da energia geotérmica é usada para aquecimento directo e 1/3 para geração de electricidade, a qual é muito competitiva em termos económicos.

A poluição do ar e da água resultante da utilização de vapor geotérmico é reduzida, quando comparada com outras fontes convencionais de energia; alguns gases sulfurosos emanados da fonte magmática podem misturar-se com o vapor de água mas certamente não produzem problemas de poluição mais graves do que o enxofre libertado da combustão do carvão. Não há, também, produção de cinzas, de resíduos radioactivos ou emissão significativa de CO<sub>2</sub>,

como acontece com outros combustíveis. As águas quentes de natureza geotérmica contém frequentemente elementos químicos dissolvidos que, devido à sua concentração, geralmente elevada, podem destruir ou corroer as tubagens (um problema significativo, que aumenta os custos de operação) e são fontes potenciais de poluição de águas superficiais ou subterrâneas se forem drenados livremente, sem tratamento prévio. Tal como se referiu a propósito da exploração de água subterrânea ou petróleo, também foram registados problemas de subsidência superficial relacionados com a exploração de recursos geotérmicos: em Wairaki (Nova Zelândia) por exemplo, observou-se subsidência da superfície superior a 0,4m/ano. Este efeito pode eventualmente ser controlado através de injeção de água no aquífero, mas a eficiência desta solução a longo prazo não está provada.

**Tabela 4.4** – Utilização e distribuição da energia geotérmica em 1991. Alguns países usam preferencialmente a energia geotérmica para geração de electricidade (México, Filipinas, E.U.A.) enquanto outros a utilizam essencialmente para aquecimento (China, Hungria, Japão).

País	Megawatt**		País	Megawatt**	
	Aquecimento	Electricidade		Aquecimento	Electricidade
Japão	3321	214,6 + 55*	Suíça	23	–
China	2143	20,9	Grécia	18	2
Hungria	1276	-	Algéria	13	–
Ex URSS	1133	11 + 50*	Colômbia	12	–
Islândia	774	44,6	Austrália	11	–
E.U.A.	463	2770	Taiwan	11	–
França	337	4,2	Guatemala	10	–
Itália	329	545 + 160*	Polónia	9	–
Bulgária	293	-	Alemanha	8	–
Nova Zelândia	258	293 + 2*	Áustria	4	–
Roménia	251	-	Canadá	2	–
Turquia	246	20,6	Tailândia	2	0,3
Indonésia	142,3	-	Reino Unido	2	–
Ex-Jugoslávia	113	-	Dinamarca	1	–
Checoslováquia	105	-	Filipinas	1	894 + 110*
Bélgica	93	-	Portugal	–	3
Tunísia	90	-	Costa Rica	–	55*
Quénia	45	-	El Salvador	–	95 + 20*
Etiópia	38	-	Nicarágua	–	35
México	28	700 + 50*			

\* Em construção.

\*\* 10<sup>6</sup> Watt. Uma central capaz de produzir 1 MW fornece energia suficiente para uma cidade com 400 habitações nos E.U.A. e 1000 em Inglaterra.

Apesar de os problemas ambientais associados com a energia geotérmica serem relativamente pequenos, limitações de outra ordem restringem severamente o seu potencial enquanto recurso energético alternativo. Efectivamente, cada

---

campo geotérmico tem uma duração limitada – algumas décadas, em média – a partir da qual o rendimento pode diminuir significativamente, visto que as rochas são más condutoras de calor. A água quente (ou vapor) extraída de um campo geotérmico, é substituída por água fria, que tem de ser aquecida antes de ser usada. Inicialmente, o aquecimento natural pode ser rápido mas, com o tempo, as rochas permeáveis arrefecem de tal modo que a água circulante aquece muito devagar e é necessário interromper periodicamente as operações de extracção para permitir o reaquecimento natural do sistema. Outra limitação associada à energia geotérmica é o carácter estacionário quer das centrais quer do recurso. Enquanto os combustíveis fósseis podem ser transportados para centros de consumo ou de transformação distantes, as centrais geotérmicas têm de ser implantadas sobre locais específicos (muitas vezes longe das grandes cidades) e a transmissão da energia que geram por longas distâncias não é tecnicamente viável. A energia geotérmica não pode contribuir para usos energéticos relevantes, como os associados aos transportes. O número total de locais com capacidade para geração de energia geotérmica é a terceira limitação. As fronteiras de placa cobrem apenas uma pequena parte da superfície da Terra, muitas delas são, na prática, inacessíveis (como os “rift” médio-oceânicos, por exemplo) e nem todas têm água subterrânea em circulação. Mesmo as áreas acessíveis que têm quantidades de água adequadas, podem não ser exploradas. É o caso do Yellowstone National Park (E.U.A.), que concentra todas as características de uma excelente área geotérmica mas que não contém nenhuma central, devido ao seu valor cénico e à singularidade do dispositivo geológico e geomorfológico.

#### 4.6.1.3 Hidroenergia

O requisito principal para a geração de quantidades substanciais de energia hidroeléctrica é dispor de grandes volumes de água em escoamento rápido. Actualmente, a geração comercial de hidroenergia implica a construção de uma barragem num rio de caudal elevado, capaz de armazenar um grande volume de água na albufeira, que é libertado a ritmo controlado e quando desejado.

A hidroenergia é uma fonte energética muito limpa. A água não é poluída quando flui através do equipamento gerador de electricidade, não é consumida pelo processo de transformação de energia, não lhe são adicionados produtos químicos nem são produzidos elementos poluentes. As centrais hidroeléctricas têm custos de operação e de manutenção baixos e a sua longevidade é cerca de 10 vezes superior à de uma central a carvão ou nuclear. A sua competitividade económica com outras fontes energéticas é demonstrada pelo facto de cerca de 1/3 das centrais geradoras de electricidade nos E.U.A. serem centrais

hidroeléctricas e de, a nível mundial, cerca de 6% da energia consumida ser de origem hidroeléctrica.

No capítulo 3 foram abordados alguns dos problemas resultantes da construção de barragens, incluindo o assoreamento das albufeiras, a destruição de habitats de vida selvagem únicos, a perda de água por evaporação, a modificação dos padrões de escoamento dos rios e mesmo, por vezes, a geração de sismos bem como a possibilidade de rotura do dique de retenção<sup>12</sup>. Tal como a energia geotérmica, a energia hidroeléctrica convencional é limitada pela natureza estacionária da fonte. Finalmente, a produção de energia hidroeléctrica é mais susceptível à variabilidade meteorológica e aos eventos extremos do que outros tipos de energia: as precipitações torrenciais e cheias centenárias são raras, tal como as secas prolongadas – mas ocorrem, obrigando a que a gestão de caudais seja modificada para acudir a estas solicitações, secundarizando a produção. Por estas razões, não é provável que o número de centrais hidroeléctricas aumente nas próximas décadas e esta fonte energética limpa, económica e renovável, pode continuar a ter no futuro uma contribuição modesta para o consumo energético global.

<sup>12</sup> A rotura de uma barragem pode acontecer devido à sua idade, deficiências de projecto ou construção ou à existência de acidentes geológicos como falhas que podem ser activas ou reactivadas pelo enchimento do reservatório.

#### 4.6.1.4 Energia das marés e das ondas

Todas as grandes massas de água armazenada em bacias extensas, à superfície da Terra, incluindo os oceanos, os mares e os grandes lagos, têm marés. Na maior parte do litoral mundial, a maré é semi-diurna, o que significa que o baixa-mar e o preia-mar ocorrem duas vezes por dia.

A energia das marés foi em tempos imemoriais utilizada em moinhos de maré, dedicados à moagem de cereais e só recentemente utilizada para geração de electricidade. As condições apropriadas para esta finalidade existem em poucos lugares do mundo: é necessária uma baía aberta para o mar e uma configuração geomorfológica do litoral que inclua uma bacia de maré separada do mar aberto por uma passagem estreita, equipada com diques e comportas, que regulem o escoamento de água para dentro e para fora de uma albufeira de retenção (caldeira); no estado de desenvolvimento tecnológico actual, requer-se ainda uma amplitude de maré (diferença entre a cota da maré alta e baixa) de pelo menos 8m. A energia das marés é hoje usada em pequenas centrais no Maine (Estados Unidos), em Saint Malô (norte de França) e na Baía de Fundy (Canadá). Em total, a energia potencial fornecida pelas marés é estimada em cerca de 2% da energia hidroeléctrica.

A energia das ondas pode igualmente ser uma fonte de electricidade. Requer um padrão regular da agitação marítima, com um espectro direccionado estreito, condições que não ocorrem frequentemente. A onda incidente e o refluxo são

---

usadas como “compressor” natural e forçam ar que, por sua vez acciona as turbinas geradoras de electricidade. A obrigatoriedade da localização das centrais na linha de costa tem muitos inconvenientes, pois as estruturas ficam sujeitas a riscos climatéricos (tais como temporais) e à corrosão acelerada pela água do mar.

#### 4.6.1.5 Energia eólica

A energia eólica é utilizada há mais de 200 anos, sendo provavelmente os moinhos de vento da Holanda o exemplo histórico melhor conhecido. São também utilizados um pouco por todo o mundo para bombear água de poços e para gerar electricidade, em casas de habitação ou quintas. Hoje em dia, há um interesse considerável em tornar mais extensiva a utilização deste tipo de energia, que é limpa e, como a solar, indefinidamente renovável (pelo menos nos próximos 5 mil milhões de anos).

O custo da energia eólica é ainda pouco competitivo com o da electricidade gerada convencionalmente porque os moinhos ou turbinas de vento, produzidos em pequena escala, são, por isso, relativamente dispendiosos.

A energia eólica partilha certas limitações com a energia solar: é dispersa e muito variável, pois o vento é intrinsecamente errático e o escoamento eólico variável em rumo e velocidade, a escalas regional e local. Esta última condicionante é especialmente importante, pois a potência gerada por dispositivos de aproveitamento eólico varia com o cubo da velocidade média do vento: se a velocidade do vento duplicar, a produção de energia aumenta de um factor 8 ( $2 \times 2 \times 2$ ). Actualmente a rentabilidade económica da energia eólica restringe-se a locais onde o vento seja persistente e a sua velocidade média exceda consistentemente os 20km/hora. Tal como outras fontes energéticas fisicamente localizadas, as dificuldades tecnológicas de transmissão da electricidade a longa distância, limitam a contribuição da energia eólica para outras áreas, com elevado consumo de electricidade. As regiões mais ventosas estão normalmente afastadas dos centros com maior densidade populacional ou industrial. Mesmo nos locais onde a velocidade média de escoamento eólico é tipicamente elevada, os ventos fortes não sopram permanentemente, o que levanta problemas de armazenamento idênticos aos já referidos para a electricidade de origem solar e que ainda não foram resolvidos satisfatoriamente.

A produção de electricidade eólica em grande escala envolve “quintas de vento”, que concentram muitas turbinas numa área restrita. A superfície comprometida para a sua instalação constitui igualmente uma limitação, embora aquela possa ser utilizada simultaneamente para agricultura e pastoreio.

---

Efectivamente, será necessário implantar cerca de 1 milhar de geradores eólicos de 1 Megawatt para assegurar uma produção equivalente à de uma central energética convencional, e as torres de suporte têm de estar espaçadas para não bloquearem significativamente o fluxo de vento; se a densidade for de 4 unidades/km<sup>2</sup>, comprometem-se cerca de 250km<sup>2</sup> para produzir energia equivalente a uma central convencional de 1000 Megawatt. Outras objecções de ordem estética (impacte visual) e ecológica (interferência com as rotas migratórias das aves) têm sido levantadas contra a construção de “quintas de vento”.

Até 1990, a energia eólica era apenas produzida em terra. Contudo, como os ventos ao largo tendem a ser mais fortes e regulares, foi construída em 1991 a primeira “quinta de vento offshore”; a energia ali produzida é 50% mais cara do que a gerada em terra, devido aos custos de construção e transmissão, mas o preço decrescerá com o melhoramento tecnológico. No futuro próximo, a electricidade gerada pelo vento pode ser mais efectiva e constituir complemento da energia convencional, onde as condições do clima de ventos forem favoráveis.

#### 4.6.1.6 *Biomassa*

O termo “biomassa” refere-se à massa total dos organismos que vivem na Terra, mas no contexto energético tornou-se chavão para designar os diferentes modos de obter energia a partir da combustão de organismos ou dos seus restos. Os combustíveis de biomassa são também designados “combustíveis não fósseis”, por oposição aos fósseis, também derivados de organismos que, no entanto, foram modificados por processos geológicos.

As possibilidades de geração de energia através da biomassa são múltiplas e o uso de madeira como combustível é um bom exemplo. A combustão doméstica representa ainda uma pequena parte da energia total consumida nos E.U.A. mas está a aumentar – cerca de 25% dos electrodomésticos naquele país queimam pelo menos em parte madeira, e é a primeira fonte de calor em cerca de 4% dos electrodomésticos vendidos naquele país; na Tanzânia e na Gâmbia, 99% da população recorre à madeira como fonte principal de energia e na Tailândia este número apenas desce para 87%. O seu consumo como combustível industrial triplica o dos usos domésticos.

Também, a porção combustível dos lixos urbanos pode ser queimada para fornecer calor em centrais eléctricas. Nos E.U.A., a energia obtida da combustão dos resíduos agrícolas e sólidos urbanos e da madeira, é aproximadamente igual à gerada por centrais hidroeléctricas. A investigação tem dedicado especial atenção a certas plantas que segregam líquidos inflamáveis ricos em

---

hidrocarbonetos, possíveis de se utilizarem como combustível líquido; existem também microorganismos cujo metabolismo produz substâncias semelhantes a petróleo, e que podem ser cultivados e produzidos artificialmente em condições controladas. Todas estas variantes de produção de energia através da biomassa são ainda utilizadas em pequena escala, mas representam opções promissoras para o futuro.

O combustível da biomassa é queimado para libertar energia e, por isso, partilha com os combustíveis fósseis os problemas da poluição por CO<sub>2</sub>. No entanto, se a taxa de queima não exceder a taxa de crescimento das plantas, esta transformação não interfere com a concentração de CO<sub>2</sub> atmosférico. Alguns combustíveis de biomassa, como a madeira, contribuem igualmente com poluentes particulados. Ao contrário dos combustíveis fósseis, os combustíveis de biomassa são renováveis, pois podemos, em princípio, produzi-los na mesma escala temporal em que são consumidos; para isso, por cada três árvores que são cortadas, pelo menos uma deve ser plantada.

#### 4.6.1.7 Conversão de energia térmica oceânica (OTEC)

Sempre que existam diferenças de temperatura significativas (cerca de 20°C) entre a água superficial do oceano (mais quente) e a água profunda (mais fria) como acontece ao longo do equador, este contraste pode ser usado para gerar electricidade. Numa central de conversão de energia térmica oceânica, a água quente (superficial) é bombeada e misturada com amónia líquida, a qual tem um ponto de ebulição muito baixo e vaporiza rapidamente. O vapor de amónia acciona as turbinas geradoras de electricidade e depois é novamente arrefecido e condensado por água fria, bombeada da profundidade, iniciando-se um novo ciclo. A energia eléctrica assim produzida é enviada para terra por cabo ou usada “in situ” para dessalinização, extracção de minerais da água do mar, ou para hidrólise e recuperação do oxigénio e hidrogénio, o último dos quais é utilizável como combustível.

O único contaminante atmosférico produzido por este processo é CO<sub>2</sub> emitido pela queima do combustível usado para operar o compressor de amónia. Mas alguns problemas técnicos subsistem, retardando o desenvolvimento da OTEC: é menos eficiente que outras metodologias, porque 1/3 da energia produzida é necessária para bombear a água fria para a superfície; os custos de construção de uma central de conversão de energia térmica oceânica são 2 a 3 vezes superiores aos das centrais a carvão; o ambiente oceânico é hostil, sujeito a tempestades, furacões, corrosão da maquinaria pela água do mar e incrustações de algas e balanídeos. Uma estação OTEC pode ser estacionária ou instalada num navio para operar onde for necessária. Existe um protótipo, no Hawai, sendo a energia utilizada na dessalinização de água, no arrefecimento de

---

edifícios, bombeamento de águas profundas ricas em nutrientes para fins agrícolas e aquacultura, e geração de electricidade.

#### 4.6.2 *Energia não renovável – a energia nuclear*

O conceito de energia nuclear compreende dois processos distintos: a fissão e a fusão, ambos com vantagens e limitações. A fissão corresponde ao fraccionamento de núcleos atómicos parentais noutros, mais pequenos, com libertação de energia; a fusão corresponde à combinação de núcleos pequenos em maiores, libertando também energia. No estado actual de desenvolvimento tecnológico, apenas a fissão nuclear é exequível e economicamente rentável, pelo que as centrais de energia nuclear usam este processo de forma controlada para gerar calor.

##### 4.6.2.1 Fissão

Todos os elementos químicos têm diferentes isótopos<sup>13</sup>, alguns estáveis e outros instáveis ou radioactivos. O oxigénio, por exemplo, tem 6 isótopos (o número de neutrões varia entre 6 e 11), três dos quais são estáveis e três radioactivos; existem também 6 isótopos de azoto, 2 estáveis e 4 radioactivos; os isótopos radioactivos destes gases são raros e têm um tempo de semi-vida muito curto. O carbono, que entra na constituição de todas as células do nosso corpo, tem também 6 isótopos, 2 estáveis e 4 instáveis e, por isso, podemos considerar todo o nosso corpo como radioactivo, embora com níveis de actividade muito baixos; o potássio, que se encontra em certos alimentos (bananas, maçãs, carne de galinha, batatas, tomate) tem um isótopo radioactivo.

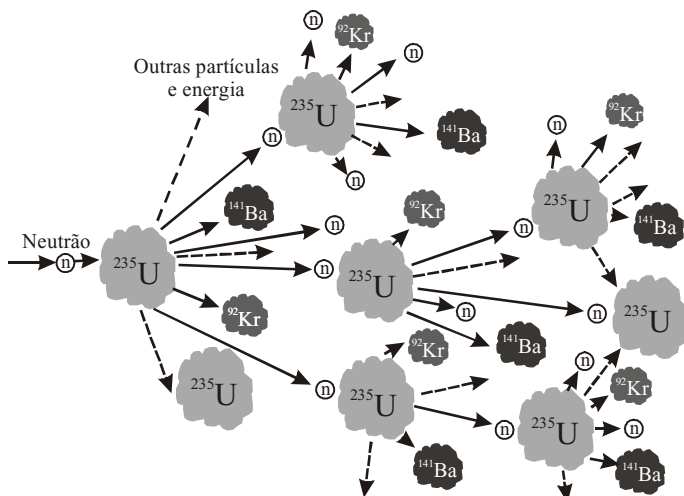
<sup>13</sup> O núcleo dos isótopos de um elemento têm o mesmo número de protões mas número de neutrões variável.

A desintegração de um núcleo instável produz diferentes tipos de radiação, com penetração diferente e, por isso, com níveis de risco diferenciados: radiação  $\alpha$  (partículas pesadas, com 2 protões e dois neutrões), radiação  $\hat{a}$  (electrões) e radiação  $\hat{a}$  (ondas electromagnéticas com comprimento de onda muito curto e elevada quantidade de energia). Cada elemento radioactivo decai de forma diferente: alguns libertam apenas partículas  $\alpha$ ,  $\hat{a}$  ou  $\hat{a}$  enquanto outros emitem combinações de diferentes tipos de radiação; uns passam do estado instável para outro, estável, numa única etapa, enquanto outros decaem através de uma sequência que produz muitos elementos instáveis intermédios antes de originarem um isótopo final estável. O perigo da exposição à radioactividade reside principalmente nos isótopos de elementos como o urânio – fonte primordial da energia nuclear – e o plutónio, que libertam espontaneamente radiação com grande poder de penetração.

---

O urânio constitui apenas 0,00016% da massa das rochas crustais. Na sua forma pura, é um metal pesado e quimicamente muito activo, razão pela qual é rara a sua ocorrência elementar, surgindo quase sempre combinado com outros elementos na forma de minerais de urânio – a uraninite (que em massas criptocristalinas é designada pechblenda) e a carnotite (complexo radioactivo hidratado de óxidos de urânio, vanádio e potássio). O urânio é o elemento natural mais denso (razão pela qual é usado em fins militares para aumentar o impacto de projecteis). Cada átomo de urânio contém 92 prótons e um número de neutrões que varia nos seus 10 isótopos radioactivos.

Os isótopos têm diferentes períodos de semi-vida, que podem variar entre fracções de segundo a mil milhões de anos. O  $^{238}\text{U}$  (com 146 neutrões), por exemplo, que perfaz 99,3% do urânio que ocorre naturalmente, tem um período de semi-vida de 4,5 mil milhões de anos (aproximadamente a idade da Terra, o que significa que metade da quantidade inicial ainda existe) e desintegra-se continuamente até originar átomos de um metal estável, o Pb. O  $^{235}\text{U}$  (com 143 neutrões), tem um período de semi-vida de 713 milhões de anos, constituindo por isso apenas 0,7% do urânio natural e os seus núcleos fissionam-se espontaneamente, libertando uma espantosa quantidade de energia. Efectivamente, quando se bombardeia o núcleo de  $^{235}\text{U}$  com um feixe de neutrões, este é induzido a dividir-se em dois núcleos mais leves –  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{141}\text{Ba}$  ou  $^{92}\text{Kr}$ , altamente radioactivos e perigosos e a libertar neutrões adicionais e energia (Fig. 4.15); alguns dos neutrões libertados induzem fissão de núcleos de  $^{235}\text{U}$  vizinhos, os quais, por sua vez, libertam mais neutrões e mais energia, prosseguindo assim o processo numa reacção em cadeia. A base de operação dos reactores nucleares, que usam  $^{235}\text{U}$  como combustível principal, é precisamente esta reacção em cadeia controlada, com libertação contínua e moderada de energia. A fissão de aproximadamente 28 g de  $^{235}\text{U}$  produz energia equivalente à obtida pela combustão de 400 barris de petróleo ou de 85 toneladas de antracite. Para que a reacção em cadeia seja mais eficiente, a proporção original do isótopo  $^{235}\text{U}$  no minério natural (cerca de 0,7%) é aumentada artificialmente (urânio enriquecido com cerca de 3% deste isótopo). O calor produzido e libertado pela reacção de desintegração, fortemente exotérmica, é utilizado para gerar vapor de água que acciona turbinas, as quais, por seu turno, geram electricidade.



**Figura 4.15** – Representação esquemática da fissão nuclear e reação em cadeia, envolvendo  $^{235}\text{U}$ .

#### 4.6.2.2 Reservas de urânio

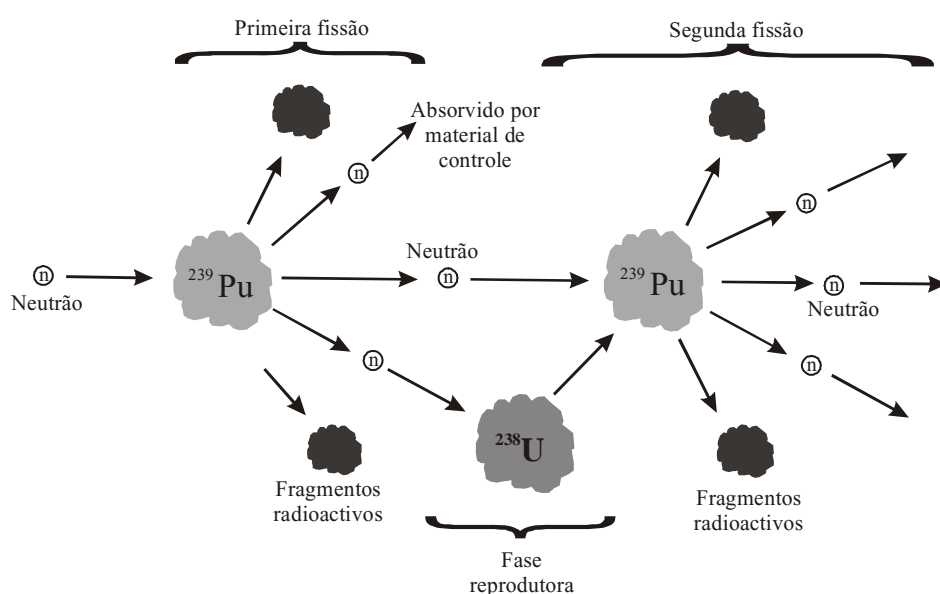
Cerca de 95% das reservas de urânio encontram-se associadas a rochas sedimentares ou metassedimentares em jazidas secundárias, de concentração. De modo geral, as rochas graníticas crustais contêm quantidades muito pequenas destes elemento mas a meteorização solubiliza-o facilmente (o urânio é particularmente solúvel em ambientes oxigenados), infiltrando-se e percolando através de rochas permeáveis, como arenitos, com a água subterrânea; aí, se as condições forem redutoras (devido à abundância de matéria orgânica por exemplo) o urânio precipita formando concentrados insolúveis e massas de minério.

As estimativas do total de  $^{235}\text{U}$  disponível são difíceis de objectivar, porque a sua importância estratégica dificulta a divulgação de informação sobre as ocorrências com potencial mineiro e porque as reservas são muito sensíveis ao preço do minério (Tabela 4.5). As reservas mundiais de urânio estimam-se em cerca de 6 milhões de toneladas, o que permite alimentar a indústria de energia nuclear nos próximos 100 anos à taxa actual de produção.

**Tabela 4.5** – Estimativas das reservas e recursos de urânio nos E.U.A..

Custo do minério/kg $\text{U}_3\text{O}_8$	Reservas (ton $\text{U}_3\text{O}_8$ )	Recursos (ton $\text{U}_3\text{O}_8$ )
US\$60	132 000	1 908 000
US\$100	463 000	3 273 000
US\$200	756 000	4 960 000

O  $^{235}\text{U}$  não é o único combustível utilizado nos reactores de fissão, embora seja o único que ocorre naturalmente. Efectivamente, o bombardeamento de  $^{238}\text{U}$  (muito mais abundante, como já se referiu) com neutrões, pode conduzir à absorção de parte daquelas partículas pelo núcleo atómico, originando isótopos artificiais, mais densos, de que o plutónio ( $^{239}\text{Pu}$ ) é exemplo, o qual, por sua vez, é fissionável. Com a disponibilidade de  $^{235}\text{U}$  limitada, a indústria nuclear desenvolveu reactores alternativos, os “reactores reprodutores”, que utilizam  $^{239}\text{Pu}$  como combustível, obtido a partir de  $^{238}\text{U}$  (não usado nos reactores convencionais) – Fig. 4.16. Por cada 100 núcleos de  $^{239}\text{Pu}$  consumidos em reacções de fissão, são produzidos 130 novos núcleos deste elemento, e daí a designação de reprodutor para este tipo de reactor.



**Figura 4.16** – Representação esquemática das reacções nucleares que ocorrem num reactor reprodutor.

#### 4.6.2.3 Problemas ambientais relacionados com a energia nuclear

Os problemas ambientais relacionados com a energia nuclear são muito diversos, desde os que resultam da exploração do minério aos consequentes da produção, manipulação e destino dos resíduos radioactivos.

A exploração e o processamento do minério de urânio são operações perigosas devido à sua radioactividade natural, embora os níveis de radiação naturais não sejam normalmente elevados devido à baixa concentração daquele elemento nas rochas. Contudo, sabe-se que a exposição à radiação, mesmo que de baixa intensidade, causa danos cumulativos, com prejuízo para a saúde podendo, por exemplo, aumentar a taxa de incidência de doenças cancerígenas.

---

A segurança dos reactores nucleares é talvez a principal objecção ao uso da energia de fissão. Em operação normal, as centrais nucleares libertam quantidades muito pequenas de radiação, que se julga inofensiva; efectivamente, a exposição do público à radiação de uma central nuclear em operação normal é cerca de 1% da radiação natural a que qualquer pessoa está sujeita e originada nos raios cósmicos, rochas e solo, raios X para fins de diagnóstico médico ou outras actividades. No entanto, o risco de avaria nos reactores nucleares, por acidente ou sabotagem, é muito preocupante; entre 1971 e 1986, foram documentados 152 acidentes em 14 países. A interrupção do abastecimento de água para arrefecimento do núcleo do reactor e consequente sobreaquecimento (com libertação de radiação para o exterior), é um dos problemas mais alarmantes. Podem igualmente ocorrer explosões internas, que originam fracturas no edifício exterior, na blindagem ou mesmo no núcleo do reactor, possibilitando a fuga de grandes quantidades de material radioactivo. A tecnologia dos reactores reprodutores é ainda mais complexa e perigosa que a dos convencionais, visto que usam sódio metálico líquido como meio de arrefecimento do núcleo (pois o reactor opera a temperaturas muito altas), o qual reage violentamente com a água e arde espontaneamente quando exposto ao ar. Além disso, o plutónio é extremamente tóxico se inalado e combustível quando exposto à atmosfera.

A localização das centrais é também problemática. Se situadas longe dos centros populacionais, a perda por transmissão é grande (superior a 10% da energia gerada) mas a sua aproximação a centros urbanos aumenta dramaticamente o risco em caso de acidente. A proximidade de água em abundância, importante para fins de arrefecimento, é habitualmente decisiva mas implica um risco acrescido de poluição, em caso de acidente. A localização de uma central nuclear considera condicionantes de natureza tectónica como falhas, as quais podem ter implicações graves, na integridade estrutural dos edifícios e escudos protectores.

Os resíduos radioactivos resultantes da laboração das centrais nucleares constituem motivo de preocupação constante, por várias razões: por um lado, e ao contrário de outros resíduos tóxicos que podem ser desactivados por métodos apropriados, o carácter radioactivo não é passível de qualquer tratamento; por outro lado, não há ainda consenso acerca da metodologia de armazenamento nem dos locais de deposição mais apropriados, pelo que nenhum dos resíduos radioactivos até hoje gerados foi armazenado de forma satisfatória nem definitiva.

Os resíduos radioactivos podem ser distinguidos de acordo com o seu grau de perigosidade. Os resíduos de baixa perigosidade constituem 99% do total produzido em termos de massa (mas correspondem apenas a 1/3, em termos volumétricos), e permanecem significativamente radioactivos durante 300-500 anos; provêm dos hospitais (onde se utiliza tecnologia nuclear para tratamento

---

do cancro), de laboratórios universitários e industriais (para fins de investigação), de manufacturas e instalações militares (fabrico e desenvolvimento de armas nucleares), sendo muito grande o número e variedade de objectos contaminados. O armazenamento de resíduos e de produtos contaminados passa pelo seu encerramento em contentores metálicos herméticos, que são depositados à superfície ou em profundidade, os quais podem porém sofrer corrosão e facilitar a fuga de líquidos radioactivos para o solo e a água subterrânea, constituindo uma fonte de contaminação activa durante muitas décadas; a opinião científica actual favorece o armazenamento deste tipo de resíduos radioactivos em escavações pouco profundas, acima do nível freático, em regiões áridas ou semi-áridas, onde seja fácil monitorizar durante alguns séculos a qualidade ambiental e possível intervenção em caso de acidente, até o resíduo deixar de ser perigoso e poder ser recolocado em aterros sanitários. Os resíduos de alta perigosidade, que constituem  $2/3$  do volume total, são produzidos por centrais nucleares, reactores de investigação e militares e mantêm níveis de radioactividade elevada durante milhares de milhões de anos. Em todo o mundo existem cerca de 430 centrais nucleares distribuídas por 35 países, onde por cada 45kg de urânio usado, 44,9kg constituem desperdício; no ano 2000, os resíduos radioactivos de todas as centrais nucleares preenchem a superfície de um campo de futebol americano com uma espessura de cerca de 78m; estes resíduos encontram-se hoje armazenados temporariamente nas próprias centrais, em locais já sobrelotados e que não foram concebidos para uso tão prolongado. As centrais nucleares têm outro problema específico adicional: o bombardeamento do núcleo do reactor e da sua estrutura por neutrões e outras partículas subatómicas resultantes do processo de fissão, converte alguns dos materiais estruturais em substâncias radioactivas e modifica as propriedades físicas de outros, podendo, nomeadamente, enfraquecer a estrutura; a central deve então, ser desmantelada e os componentes radioactivos descartados acrescentam volume aos resíduos anteriores; este processo é dispendioso e pode durar mais de uma década pelo que, embora o tempo médio de vida útil de uma central nuclear seja de cerca de 30 anos, permite-se o seu prolongamento até aos 70, se a monitorização rigorosa do edifício e a substituição de alguns componentes-chave, forem efectuadas. Alguns critérios para armazenamento de resíduos radioactivos de alta perigosidade devem ser observados:

1. o local deve ser totalmente impermeável à água, que poderia transportar material radioactivo; o armazém deve pois ser subterrâneo, mas localizado a pequena profundidade, para que o nível freático local nunca alcance os contentores de resíduos;
2. as rochas encaixantes não podem estar fracturadas para prevenir fugas e derrames. Esta condição implica uma escolha criteriosa do enquadramento litológico e estrutural; normalmente são preferidas zonas

---

graníticas, de rochas vulcânicas ou algumas rochas metamórficas; as rochas sedimentares não são apropriadas devido à sua porosidade (principalmente nos arenitos), solubilidade (nos calcários), grau de fraturação ou plasticidade (rochas evaporíticas);

3. o local deve ser estável do ponto de vista sísmico nos próximos 10 000 anos, caso contrário as instalações poderiam colapsar e as falhas activas tornar-se vias de migração para a água subterrânea;
4. o local deve estar longe de aparelhos vulcânicos activos;
5. o local deve ter bom acesso rodoviário e ferroviário para facilitar o transporte de resíduos;
6. o sítio escolhido deve estar longe de centros populacionais.

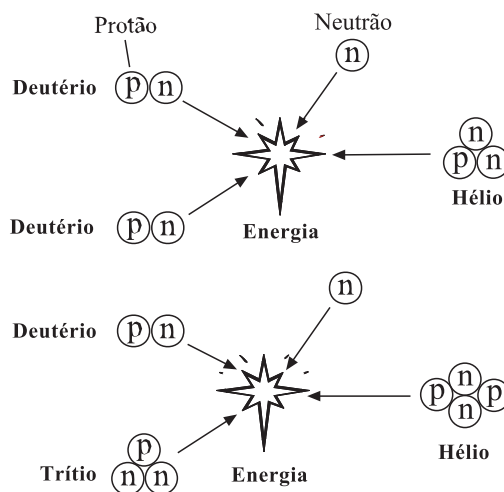
Tendo em conta a dimensão gigantesca do período de semi-vida dos resíduos produzidos pelas centrais nucleares de fissão, não é possível efectuar previsões credíveis sobre o grau de segurança associado a qualquer tipo de armazenamento destes materiais; como exemplo, note-se que a radioactividade foi descoberta apenas em 1896 e que a teoria da tectónica de placas bem como os modelos geodinâmicos globais associados foram aceites depois de 1960; há 15 000 anos atrás o clima era muito diferente do actual em muitas áreas do Globo e há menos de 10 000 anos havia vulcanismo activo no que é hoje a França Central. Como disse em 1990 o então Presidente da Sociedade Geológica Americana, nenhum cientista, técnico ou engenheiro pode garantir a inexistência de fugas radioactivas no futuro, mesmo nos melhores locais de armazenamento conhecidos.

O optimismo inicial acerca da energia nuclear diminuiu substancialmente nos últimos anos. No entanto, a escassez dos combustíveis fósseis e os problemas ambientais associados à combustão do carvão (a alternativa disponível mais imediata) podem fazer com que este tipo de energia alternativa aumente novamente de importância.

#### 4.6.2.4 Fusão

Tal como se referiu antes, a fusão é o processo pelo qual dois ou mais núcleos atómicos pequenos se combinam para formar um núcleo maior, com concomitante libertação de energia (Fig. 4.17). O combustível necessário para este processo é um elemento muito abundante – o hidrogénio – constituindo a água dos oceanos uma enorme reserva. Mesmo considerando a escassez de deutério natural (isótopo de hidrogénio contendo um protão e um neutrão),

que consiste apenas em 0,015% do hidrogénio natural e de trítio (isótopo com um protão e dois neutrões) que ainda é mais raro e teria que ser produzido a partir do lítio, metal também escasso, a abundância do combustível não constitui um constrangimento sério, dada a quantidade de energia libertada pelas reacções de fusão.



**Figura 4.17** – Representação esquemática de duas potenciais reacções de fusão.

O resíduo principal das reacções de fusão – o hélio – é um gás não tóxico, quimicamente inerte e inofensivo; embora a síntese do hélio possa ser acompanhada de outros elementos intermédios, radioactivos, nos reactores de fusão, eles são seguramente menos prejudiciais do que muitos dos produtos originados pelos sistemas de fissão. Assim, a principal razão da não utilização deste tipo de energia é de ordem tecnológica: a efectivação de uma reacção de fusão nuclear ocorre a temperaturas extremamente elevadas, que nenhum material conhecido pode suportar; até hoje, as experiências efectuadas em situação controlada alcançaram as condições necessárias durante fracções de segundo e com um consumo energético superior ao da energia libertada; serão, pois, necessárias ainda algumas décadas de investigação intensiva e dispendiosa, antes que a fusão controlada se torne uma realidade e seja viável do ponto de vista comercial, embora a abundância de combustível e os benefícios ambientais (comparativamente à fissão e aos combustíveis fósseis) a indiquem como a opção mais atractiva neste século.

---

## Actividade 4.4

1. O que é um combustível fóssil? Que combustíveis fósseis são mais importantes como fontes energéticas?
2. Descreva o processo de formação do carvão.
3. Quais são os perigos que os mineiros de carvão têm de enfrentar no desempenho da sua profissão? Como é que estes perigos se modificaram no último século?
4. Porque é que no Carbónico se formaram espessos depósitos de carvão em vários continentes?
5. O que é a drenagem ácida das minas?
6. Quais são as armadilhas mais comuns de petróleo e gás natural? Porque é necessária decomposição anaeróbia para a formação de petróleo e carvão?
7. Explique como é que a produção de petróleo pode poluir o ambiente.
8. Descreva como mudaria o seu estilo de vida se a produção de petróleo fosse cancelada.
9. Quais são as vantagens de usar gás natural em vez de petróleo como fonte de energia?
10. O que é a “janela do petróleo”?
11. Quais são as desvantagens das centrais hidroeléctricas? Quais os problemas associados à energia geotérmica?
12. Qual é o maior desafio tecnológico à utilização do potencial total da energia solar?
13. Liste as vantagens e desvantagens de usar energia eólica e hidroenergia para gerar electricidade.
14. Qual a natureza e fonte do combustível usado num reactor nuclear? Quais as vantagens dos reactores reprodutores?

---

## Bibliografia

ARMS, K.

1990 *Environmental science*. Saunders College Publishing, 468 p.

BELL, F. G.

1998 *Environmental Geology. Principles and Practice*. Blackwell Science, 594 p.

BENNETT, M. R. e DOYLE, P.

1997 *Environmental Geology. Geology and the human environment*. John Wiley e Sons, 501 p.

BLATT, Harvey

1997 *Our Geologic Environment*. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 541 p.

CHIRAS, D.

2001 *Environmental Science. Creating a sustainable future*. Library of Congress Cataloging-in-Publication Data, 730 p.

COATES, D. R.

1981 *Environmental Geology*. John Wiley & Sons, 701 p.

CUNNINGHAM, W. P. e SAIGO, B. W.

1995 *Environmental Science. A global concern*. 3.<sup>a</sup> edição. WCB Publishers, 612 p.

McKINNEY, M. L. e SCHOCH, R. M.

1998 *Environmental Science. Systems and Solutions*. Jones and Bartlett Publishers, 639 p.

MERRITTS, D.; WET, A. e MENKING, K.

1997 *Environmental Geology. An Earth System Science Approach*. W. H. Freeman and Company, New York, 452 p.

MORAN, J. M.; MORGAN, M. D. e WIERSMA, J. H.

1986 *Introduction to Environmental Science*. W. H. Freeman and Company, 2.<sup>a</sup> edição, 709 p.

---

MURCK, B. W.; SKINNER, B. J. e PORTER, S. C.

1996 *Environmental Geology*. John Wiley & Sons, Inc., 535 p.

PARTEX-CPS

s/d *O petróleo. Da pesquisa à produção*. AP Edições, 63 p.

THOMPSON, G. R. e TURK, J.

1993 *Earth Science and the Environment*. Saunders College Publishing, 622 p.

TURK, J. e THOMPSON, G. R.

1995 *Environmental Geoscience*. Saunders College Publishing, 428 p.

MONTGOMERY, C. W.

1995 *Environmental Geology*. 4.<sup>a</sup> edição, WCB Publishers, 496 p.

Endereços electrónicos

<http://www.geocities.com/Augusta/7135/estufaestufa.htm>

<http://www.shef.ac.uk/uni/academic/A-C/archst/eei/infopack/gentext/global.doc>

<http://www.envirolink.org>

Página intencionalmente em branco

---

## **5. Recursos minerais**

Página intencionalmente em branco

---

## SUMÁRIO

---

- 5.1 **Introdução**
- 5.2 **Recursos minerais metálicos e não metálicos**
- 5.3 **Factor de enriquecimento**
- 5.4 **Formação dos recursos minerais**
  - 5.4.1 *Processos hidrotermais*
  - 5.4.2 *Processos magmáticos*
    - 5.4.2.1 Pegmatitos
    - 5.4.2.2 Intrusões bandadas
    - 5.4.2.3 Kimberlitos
  - 5.4.3 *Processos metamórficos*
  - 5.4.4 *Processos sedimentares*
    - 5.4.4.1 Concentração mecânica – os placers
    - 5.4.4.2 Precipitação química
  - 5.4.5 *Meteorização – Depósitos de minerais residuais*
  - 5.4.6 *Recursos minerais dos oceanos actuais*
- 5.5 **Procura futura e oferta de minerais a nível mundial**
- 5.6 **Reciclagem**
- 5.7 **Substituição**
- 5.8 **Conservação e durabilidade**
- 5.9 **Degradação ambiental devida à exploração mineira**
  - 5.9.1 *Produção de resíduos rochosos e escombrelras*
  - 5.9.2 *Drenagem ácida da mina*
- 5.10 **Degradação ambiental devida ao processamento de minério**
- 5.11 **Restauração**
- 5.12 **Ciclo dos metais**
- 5.13 **Exploração de recursos minerais não metálicos**

---

## Objetivos

- Interiorizar a dependência do Homem em relação aos recursos minerais e à disponibilidade destes;
- Conhecer os processos de formação dos recursos minerais;
- Caracterizar os impactos da exploração e processamento dos minerais metálicos e não metálicos.

**Palavras-chave:** Conservação, minerais críticos, desmaterialização, durabilidade, evaporitos, reservas exponenciais, processos hidrotermais, processos magmáticos, processos sedimentares, minerais metálicos, depósitos minerais, reservas minerais, recursos minerais, minério, pegmatitos, placers, reciclagem, escassez, reservas estáticas, minerais estratégicos, processamento, factor de enriquecimento, kimberlito, nódulos de manganês, escombeiras.

## 5.1 Introdução

Um recurso mineral é qualquer material natural (mineral ou rocha) suficientemente enriquecido em um ou mais elementos, com valor para o Homem e que pode ser extraído da litosfera. Os depósitos conhecidos que podem ser explorados com mais-valia económica e com as tecnologias disponíveis, constituem as reservas desse mineral (Fig. 5.1). A fronteira entre reservas e recursos sub-económicos – aqueles cujo custo de extracção excede o valor de mercado – varia no tempo, à medida que se desenvolvem novas tecnologias de exploração, mais eficientes, ou que as reservas existentes são exploradas e o preço do recurso sobrance aumenta, ou ainda se forem descobertos novos depósitos (Fig. 5. 2). A descoberta de novos recursos é mais provável em províncias geológicas e mineiras já conhecidas, sendo os depósitos com ocorrência possível nesses locais considerados recursos hipotéticos.

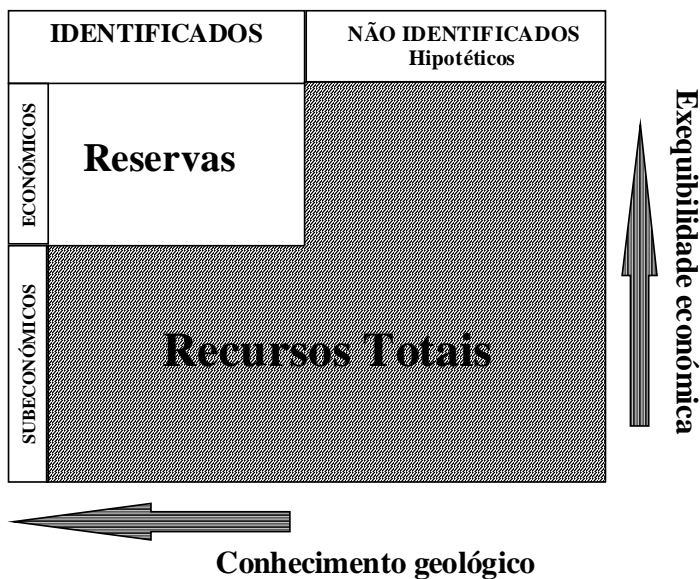
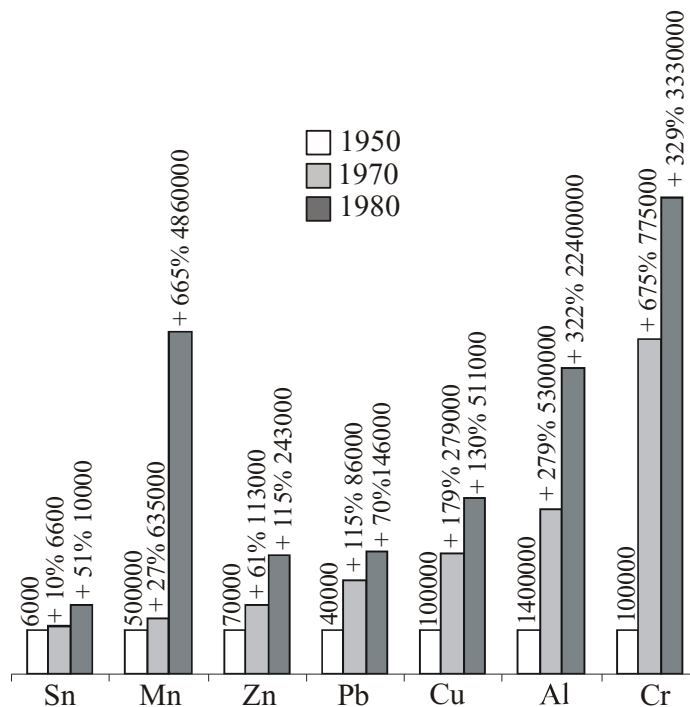


Figura 5.1 – Diagrama de McKelvey.



**Figura 5.2** – Modificações das reservas (em milhares de toneladas) de alguns elementos entre 1950 e 1980.

As sociedades modernas são extremamente dependentes dos recursos minerais como também já o foram algumas civilizações “avançadas” do passado. A utilização de recursos minerais diferentes, implicando níveis de progresso tecnológico e civilizacional distintos, ofereceu ao arqueólogo holandês, Christian Jurgensen Thomsen, fundamento para dividir os milhões de anos de evolução humana na Eurásia e na África em três grandes idades tecnológicas: Idade da Pedra, iniciada há vários milhões de anos e que termina há cerca de 5500 anos; a Idade do Bronze<sup>1</sup>, compreendida entre 5500 e 3600 anos atrás; a Idade do Ferro, entre 3600 anos e o presente. Assim, estamos actualmente na Idade do Ferro na medida em que este continua a ser o metal dominante na indústria, embora certos autores sugiram que já entrámos na Idade do Silício, devido à sua importância actual na produção de semi-condutores, a base da indústria e tecnologia electrónicas.

Em termos globais, o uso de minerais aumenta com o tempo. Antes do séc. XIX, o consumo era insignificante quando comparado com a sua abundância nos depósitos geológicos. Contudo, a partir da Revolução Industrial, a utilização de recursos minerais aumentou a um ritmo elevado, tendo decuplicado entre 1750 e 1900 com a duplicação da população mundial e aumentando cerca de 13x durante o século XX. O consumo de alguns metais experimentou um aumento ainda mais dramático. Efectivamente, a produção/consumo anual de

<sup>1</sup> O Bronze é a designação colectiva de todas as ligas de cobre com outros elementos, em especial o ferro.

ferro é actualmente de 33 600 milhões de ton, ou seja, cerca de 22 000 vezes a produção de há 3 séculos atrás. Também, a produção de cobre e zinco aumentou 560x e 7300x respectivamente, nos últimos 200 anos. A procura de metais como o estanho, o zinco, o cobre e o alumínio cresce actualmente cerca de 1 a 4% ao ano (Tabela 5.1).

**Tabela 5.1** – Taxa de crescimento da procura e tempo de duplicação desta, para alguns metais.

Metal	Taxa de crescimento da procura (%)	Tempo de duplicação (anos)
Alumínio	4,0	18
Cobre	2,7	26
Ferro	2,4	29
Chumbo	1,8	39
Níquel	3,0	23
Estanho	1,0	70
Zinco	2,0	35

Cada um de nós usa, directa ou indirectamente, uma grande variedade e quantidade de materiais derivados de matérias-primas minerais (Fig. 5.3). O consumo de minerais nos países industrializados é muito mais elevado do que nas nações em vias de desenvolvimento. Embora reúnam apenas aproximadamente 20% da população mundial, os primeiros consomem cerca de 75% destes recursos. O uso de minerais per capita em qualquer país desenvolvido é cerca de 50 vezes o de nações africanas em vias de desenvolvimento. Como já referido anteriormente, nos E.U.A. (país com menos de 5% da população mundial e 7% da área), consome-se 25% da produção mineral, o que significa, em média, 10 ton/pessoa/ano. Os americanos usam cerca de 25 vezes mais níquel do que os habitantes da Índia, 4 vezes mais aço e 23 vezes mais alumínio que os mexicanos. De acordo com algumas estimativas, os E.U.A. consumiram mais minerais entre 1940 e 1976 do que toda a humanidade até 1940. Contudo, a partir dos anos 70, o uso de matérias-primas nos E.U.A. e na Europa Ocidental deixou de aumentar e experimentou mesmo declínio. Esta tendência é devida ao facto de as economias industriais ocidentais se basearem em produtos e serviços de alta tecnologia que utilizam menos matéria-prima. Também, a infra-estrutura de muitas nações industrializadas está hoje completa – as grandes construções e os mega projectos públicos nacionais, são cada vez menos comuns. Contudo, em termos absolutos, a procura de minerais é ainda extremamente elevada e se os países em desenvolvimento persistirem em procurar melhorar a qualidade de vida dos seus habitantes, necessitarão de cada vez mais minerais à medida que se vão

industrializando. É também possível que, nas próximas décadas, alguns países industrializados necessitem de substituir grandes segmentos das suas infra-estruturas, já idosas, e daí resultarem episódios localizados no tempo mas significativos, de aumento da procura de recursos minerais. É, pois, pouco provável que a procura mundial de minerais possa diminuir substancialmente ou mesmo estabilizar nas próximas décadas.



**Figura 5.3** – Consumo (kg) de materiais *per capita* no ano de 1990.  
A – Nos E.U.A.; B – No mundo.

## 5.2 Recursos minerais metálicos e não metálicos

A quantidade e diversidade de minerais e rochas usadas pelo Homem é tão grande que classificar estes recursos de forma simultaneamente útil e simples é praticamente impossível. Todas as rochas e minerais podem ser usados para algum fim e uma classificação possível consiste em agrupá-los de acordo com o seu uso, em recursos minerais metálicos e não metálicos (Tabela 5.2). Os primeiros, que incluem os minerais de onde se extraem metais comuns como o ferro, o cobre e o chumbo (metais base) e os metais preciosos – o ouro, a prata e os metais do grupo da platina, são designados por minério. Por exemplo, a galena é um minério de chumbo que ocorre na forma de sulfureto ( $PbS$ ); é a principal fonte do chumbo utilizado nas baterias dos automóveis. A hematite é um minério de ferro que ocorre na forma de óxido ( $Fe_2O_3$ ) e fornece a maior parte do ferro utilizado no fabrico do aço. A ilmenite é um minério de titânio, que surge na forma de óxido ( $FeTiO_3$ ) e é a principal fonte do titânio que se adiciona ao ferro para fabricar aços especiais.

**Tabela 5.2** – Principais substâncias minerais agrupadas de acordo com o seu uso.

Metais	Geoquimicamente abundantes	Fe, Al, Mg, Mn, Ti
	Geoquimicamente escassos	Cu, Pb, Zn, Ni, Cr, Au, Ag, Sn, Hg, Mo, U, Pt
Minerais não metálicos	Químicos	Halite, carbonato de sódio, enxofre, borax, fluorite
	Fertilizantes	Apatite, silvite, enxofre, carbonato de cálcio, nitrato de sódio
	Construção	Gesso, calcário, argila, asbestos, areia, cascalho, balastros, xisto, outras rochas
	Joalheria	Diamantes, corindo (safiras, rubis), granadas, ametista, berilo (esmeralda), entre outros
	Cerâmica	Argila, feldspato, quartzo
	Abrasivos	Diamante, granada, corindo, quartzo, pedrapomes

Cerca de 70% dos elementos que existem na crosta terrestre são metálicos e qualquer deles pode ser útil à civilização humana. Os metais mais utilizados são os que reúnem algumas condições em simultâneo: têm propriedades únicas (dureza, resistência à corrosão, condutividade eléctrica, temperatura de fusão, etc.), são relativamente abundantes, fáceis de localizar e de explorar e, conseqüentemente, são relativamente baratos. A tabela 5.3 lista os principais minérios e os seus usos. Cada metal tem um custo, distribuição geográfica, utilidade, problemas de extracção, de processamento e ambientais específicos. Um exemplo paradigmático é o do cobre, metal dúctil, essencialmente consumido na produção fios condutores eléctricos para uso doméstico e industrial, e secundariamente no fabrico de moedas, jóias e bronze. O ouro e a prata são melhores condutores de electricidade: têm resistividade mais baixa e por isso os condutores destes metais não necessitam de secções tão largas como as de cobre (por essa razão são usados em alguns componentes electrónicos, bastante caros). Por outro lado, o processamento do cobre é substancialmente mais económico; enquanto este é maioritariamente recuperado a partir da calcopirite, um sulfureto de cobre e ferro ( $\text{CuFeS}_2$ ), mais abundante, o ouro e a prata ocorrem naturalmente como metais nativos puros, menos abundantes; estas variáveis reflectem-se nos preços relativos do cobre, prata e ouro, conduzindo à maior utilização do primeiro metal na indústria de componentes eléctricos.

Igual importância tem também a exploração de depósitos minerais não metálicos (Tabela 5.2), utilizados principalmente na indústria da construção e como matéria-prima para químicos e fertilizantes. Os minerais não metálicos, cujas acumulações são simplesmente denominadas por depósitos minerais e não por minérios, incluem os asbestos, utilizados para produção de amianto, as rochas fosfatadas, processadas para fertilizantes agrícolas, a areia e cascalho,

usados na construção, o quartzo utilizado para o fabrico de vidro, a grafite que é constituinte de lubrificantes, o enxofre, usado em produtos químicos (ácido sulfúrico), etc.

De todos os recursos geológicos não renováveis (incluindo os combustíveis fósseis) a areia, o cascalho, a brita e a pedra de construção são os mais procurados em termos de consumo total (Tabela 5.4). Contudo, perfazem apenas uma pequena percentagem (4 a 10%) do valor económico total dos recursos minerais consumidos anualmente.

Os recursos minerais têm distribuição desigual na face do globo pois diferentes depósitos minerais formam-se em condições geológicas específicas. Em geral, os recursos minerais são não renováveis e finitos; alguns, já não se formam mais e aqueles que ainda se podem formar por processos geológicos, são extraídos a um ritmo que excede largamente a sua taxa de reposição natural.

Toda a indústria mundial depende de 80 a 100 minerais. Certos minerais são classificados como críticos quando necessários à produção de bens essenciais e para os quais não foram ainda encontrados substitutos. Entre estes, metade a um terço são considerados estratégicos, isto é, minerais críticos de que um país necessita mas não produz e importa de regiões potencialmente instáveis do ponto de vista político, militar ou social.

**Tabela 5.3** – Principais minérios e respectiva utilização.

Metal	Minério principal	Utilização
Alumínio	Bauxite	Contentores de alimentos, transportes, electrónica, ligas leves
Antimónio	Antimonite ou estibina	Ligas, baterias, balas, rolamentos
Chumbo	Galena	Tubagens, solda, baterias, pigmentos, balas
Cobalto	Cobaltite	Pigmentos de tinta, ligas, medicina nuclear, vernizes
Cobre	Calcopirite	Fios eléctricos, tubagens, latão, bronze, moeda
Crómio	Cromite	Cromagem, pigmento amarelo das tintas, aço inoxidável, acabamentos das pinturas de automóveis
Estanho	Cassiterite	Contentores, bronze, soldas
Ferro	Hematite	Principal constituinte do aço
Manganês	Pirolusite	Aço, ligas, baterias, químicos
Mercúrio	Cinábrio	Termómetros, lâmpadas, amalgamas de tratamento dentário <sup>2</sup>
Molibdénio	Molibdenite	Filamentos de lâmpadas, utensílios refractários, lubrificantes, armas
Níquel	Pentlandite	Ligas, niquelagem, motores de avião, moeda
Ouro	Metal nativo	Joalharia, moeda, ligas, revestimentos, medicina dentária
Platina	Metal nativo	Joalharia, equipamento eléctrico, catalizadores
Prata	Metal nativo	Joalharia, película fotográfica, espelhos, revestimentos, talheres e outros utensílios
Titânio	Rútilo	Pigmentos, componentes de satélites e aviões, ligas especiais
Tungsténio	Volframite	Utensílios refractários, filamentos de lâmpadas, medicina dentária, armas, aços
Urânio	Carnotite	Energia e armas nucleares
Zinco	Esfalerite	Baterias, latão, revestimentos

<sup>2</sup> Embora o mercúrio seja muito tóxico, testes efectuados mostraram que nenhum efeito prejudicial ocorria com o seu uso na massa de tratamento dentário.

Tal como o seu nome sugere, a acessibilidade aos minerais estratégicos condiciona a economia, força militar ou política dos países ou governos. Por esta razão, as nações industrializadas armazenam minerais estratégicos nas alturas em que as cotações baixam e o mercado os disponibiliza, mantendo-os como um “stock” de emergência em quantidade suficiente para satisfazer requisitos militares (ou outros) durante pelo menos 3 anos. Os E.U.A., Europa e Japão importam a maioria dos seus minerais estratégicos (tais como os de Al, Au, Cr, Mn, Cd, Co, Pt) de nações africanas.

**Tabela 5.4** – Estimativa da produção mundial em 1990 (milhares de toneladas) de alguns minerais.

Minerais metálicos	Ferro	552 000
	Alumínio	18 100
	Cobre	8 920
	Manganês	8 600
	Zinco	7 300
	Crómio	3 784
	Chumbo	3 350
	Níquel	949
	Estanho	216
	Molibdénio	114
	Titânio	102
	Prata	15
	Mercúrio	6
	Metais do grupo da platina	0,3
Ouro	0,2	
Minerais não metálicos	Pedra	11 000 000
	Areia e cascalho	9 000 000
	Argila	500 000
	Sal	191 000
	Fosfatos	166 350
	Cal	135 300
	Gesso	99 000
	Soda	32 000
	Potássio	28 125

A importância destes minerais pode ser exemplificada pela variação da política externa dos E.U.A relativamente ao Zimbabué. Em 1966 os E.U.A. apoiaram as medidas internacionais de sanções económicas contra aquele país devido

às suas políticas racistas internas, levando à suspensão das importações. Contudo, em 1971, esta política foi revista quando as reservas norte americanas de Cr (importado quase exclusivamente do Zimbabué), baixaram significativamente.

### 5.3 Factor de enriquecimento

Muitos dos metais que usamos diariamente ocorrem na crosta terrestre em concentrações muito pequenas (Tabela 5.5). À escala global, apenas 8 elementos (O, Si, Al, Fe, Ca, Na, Mg e K) são abundantes, formando mais de 99% da massa da crosta terrestre (Tabela 5.5).

Para cada mineral há um grau ou nível de concentração abaixo do qual o depósito não pode ser explorado economicamente. Felizmente para nós, certos processos geológicos podem concentrar os minerais em áreas pequenas, resultando um depósito naturalmente enriquecido a partir do qual aqueles metais podem ser extraídos economicamente. O cobre, por exemplo, constitui apenas 0,0055% da crosta, concentração muito pequena para justificar o custo da sua extracção da maioria das rochas crustais. Para que uma exploração de cobre seja lucrativa, o mineral cuprífero (por exemplo calcopirite) deve ser suficientemente enriquecido para conter pelo menos 0,5% de cobre<sup>3</sup>. Esta percentagem excede em cerca de 90 vezes a sua abundância média na crosta. Nas minas de tungsténio, o minério deve ocorrer com um enriquecimento natural 2000 vezes superior à sua concentração média na crosta terrestre; o chumbo, deve ser naturalmente concentrado 2400 vezes e o mercúrio 12500 vezes. Devido à alta concentração necessária para as minas serem lucrativas, pode ser difícil encontrar depósitos economicamente viáveis. A figura 5.4 mostra como as concentrações de chumbo necessárias para exploração estão naturalmente disponíveis em poucas rochas. Na curva de abundância da figura 5.4, estamos presentemente a substituir depósitos facilmente exploráveis (no extremo direito) por outros com concentrações mais baixas. Em dado momento, a extracção de chumbo tornar-se-á demasiado cara (ponto 1 daquele gráfico). A procura futura de chumbo poderá estender a exploração rentável até ao ponto 2 mas os custos de extracção crescerão muito. Este mesmo padrão de variação é válido para outros metais (cobre, crómio, tungsténio, etc.).

<sup>3</sup> Este valor variou, evidentemente, ao longo do tempo. Há cerca de 2000 anos, a tecnologia existente necessitava de concentrações mínimas de cobre de 15% para justificar a exploração deste metal. Por volta de 1500 d.C. esta concentração tinha-se reduzido para 9% e em 1800 para cerca de 6-7%, valor que se prolongou até ao início do século XX.

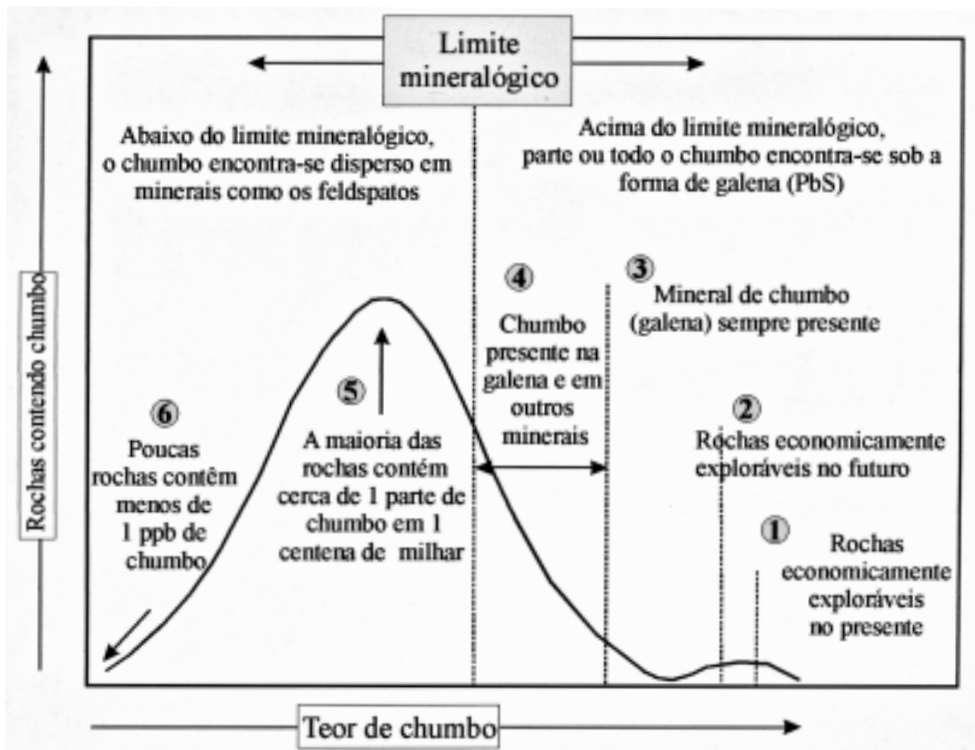


Figura 5.4 – Limite mineralógico.

A razão entre a concentração apresentada por uma substância numa dada ocorrência de modo a ser economicamente recuperável e a sua abundância média na crosta terrestre constitui o seu factor de enriquecimento ou factor de concentração económica. Cada mineral, metal ou substância tem o seu factor de enriquecimento próprio, que representa um balanço entre o seu preço de mercado e a sua abundância média na crosta. Em geral o factor de enriquecimento é mais elevado para metais raros na crosta (como o mercúrio, por exemplo), ou seja, o factor de concentração necessário para uma extração lucrativa é inversamente proporcional à média da concentração crustal.

**Tabela 5.5** – Abundância média de alguns elementos na crosta terrestre (% ponderal), concentração natural de metais necessária para constituir minério (% ponderal) e respectivo factor de enriquecimento.

Elemento	Abundância média	Concentração natural	Factor de enriquecimento
Oxigénio	46,6	–	–
Sílica	27,7	–	–
Alumínio	8,3	40	5
Ferro	5,6	25	4
Cálcio	3,6	–	–
Sódio	2,8	–	–
Potássio	2,6	–	–
Magnésio	2,1	–	–
Titânio	0,57	15	25
Fósforo	0,07	–	–
Carbono	0,03	–	–
Manganês	0,095	25	260
Vanádio	0,0135	0,5	35
Crómio	0,010	40	4000
Níquel	0,0075	1	130
Zinco	0,0070	2,5	350
Cobre	0,0055	0,5	90
Cobalto	0,0025	0,2	80
Chumbo	0,00125	3	2400
Urânio	0,00027	0,01	40
Estanho	0,00020	0,5	250
Molibdénio	0,00015	0,1	660
Tungsténio	0,00015	0,3	2000
Mercúrio	0,000008	0,1	12500
Prata	0,000007	0,005	700
Platina	0,0000005	0,0002	400
Ouro	0,0000005	0,0001	250

Metais como o Al ou o Fe, que constituem 6 a 8% da média da crosta continental, respectivamente, necessitam de factores de concentração mais pequenos, de 4 a 5 vezes, para serem economicamente extraíveis. As excepções a esta regra são os poucos elementos extremamente valiosos como o ouro que são tão caros que uma pequena quantidade justifica extracção.

A viabilidade de uma mina depende também do mineral a partir do qual se extrairá o metal, pois isso afecta o custo de extracção. Três depósitos de Fe com igual concentração terão viabilidade económica distinta consoante o Fe

---

ocorrer sob a forma de óxido, silicato ou sulfureto. As densidades relativas dos minerais de ferro comparadas com as de outros minerais na rocha, afectará a facilidade com que esses minerais podem ser separados dos restantes; a natureza e força das ligações químicas das fases ricas em ferro influenciará os custos energéticos necessários para as destruir e extrair o ferro, bem como a complexidade do processamento químico requerido.

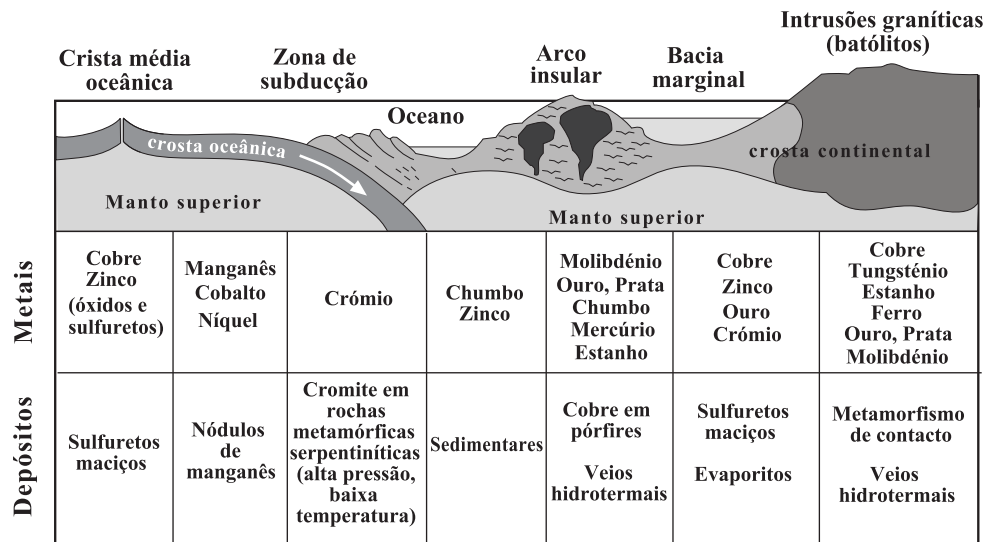
#### 5.4 Formação dos recursos minerais

Os depósitos minerais são formados por processos geológicos e a sua ocorrência depende do ambiente de concentração passado ou presente, no contexto do ciclo tectónico. Esta concentração pode resultar:

1. do fluxo de soluções aquosas quentes através de fracturas e poros da rocha crustal, produzindo depósitos minerais hidrotermais;
2. de bandas de metamorfismo, produzindo depósitos minerais metamórficos por recristalização;
3. de processos ígneos dentro de um corpo magmático em cristalização, produzindo depósitos minerais magmáticos;
4. da precipitação a partir da água de um lago ou do mar, produzindo depósitos minerais sedimentares quimiogénicos;
5. da acção selectiva das ondas ou correntes da água superficial, produzindo placers;
6. de meteorização, produzindo depósitos minerais residuais.

A identificação de um ambiente tectónico específico permite aos geólogos localizar as áreas mais ou menos favoráveis a tipos específicos de depósitos minerais. A teoria da tectónica de placas fornece um enquadramento teórico útil para explicar a distribuição global, em larga escala, dos principais depósitos minerais.

A figura 5.5 mostra que muitos minerais metálicos estão concentrados sobre ou perto de fronteiras de placa convergentes. Visto que as temperaturas são aqui muito elevadas em profundidade, as rochas subductadas fundem, permitindo a dissolução dos elementos metálicos e a sua incorporação no magma que ascende e podem formar-se depósitos de minério concentrado, normalmente sob a forma de óxidos e sulfuretos. A ocorrência de calcopirite nos orógenos resultantes da convergência de placas tectónicas ao longo da costa das Américas do Norte e Sul, é disso um exemplo.



**Figura 5.5** – Relação entre a ocorrência de minério e processos tectónicos.

Como referido, os recursos minerais podem ocorrer nos três tipos de rochas – ígneas, metamórficas e sedimentares. As regiões nas quais determinados depósitos de minerais metálicos ocorrem em largas quantidades, são designadas províncias metalogénicas. Embora na sua maioria os depósitos minerais estejam ligados à convergência de placas, ocorrem igualmente ao longo de fronteiras divergentes, onde a água do mar é aquecida nas cristas médias oceânicas.

#### 5.4.1 *Processos hidrotermais*

Os minérios podem formar-se por deposição de minerais a partir de soluções hidrotermais – fluidos aquosos quentes com temperaturas da ordem de 100/700°C que, devido à sua elevada acidez e poder corrosivo, dissolvem grande quantidade de iões (cobre, ouro, chumbo, zinco e prata, por exemplo). As soluções hidrotermais alteram a mineralogia das rochas por onde passam, formando depósitos disseminados ou veios minerais. Os depósitos hidrotermais consistem frequentemente em minerais comuns como o quartzo e a calcite, associados a outros com valor económico (sulfuretos de cobre, zinco e molibdénio, ouro, prata, mercúrio, entre outros).

Algumas soluções hidrotermais são juvenis, originando-se quando a água dissolvida no magma é libertada à medida que este ascende e arrefece. Outras, são formadas a partir da água da chuva ou do mar que circula profundamente dentro da crosta. A água do mar penetra nas rochas vulcânicas do fundo oceânico e uma vez aquecida pelo corpo magmático subjacente, transforma-

---

-se numa solução hidrotermal que reage com as rochas encaixantes, alterando a sua composição química e mineralogia; à medida que os minerais em reacção se transformam, alguns metais como o Cu, Pb, Au, Pt e Zn são libertados e concentram-se na solução hidrotermal que ascende no rifte médio oceânico sob a forma de uma pluma hidrotermal. Embora estes metais ocorram nas rochas atravessadas em concentrações baixas, as soluções hidrotermais percolam lentamente através de vastos volumes crustais, dissolvendo e acumulando grandes quantidades de metais. Como o enxofre é um constituinte comum dos gases e fluidos magmáticos, os minérios que se formam nestas condições são frequentemente sulfuretos, pelo que os depósitos associados são chamados sulfuretos maciços vulcanogénicos (pois o vulcanismo é a fonte energética e calorífica primária). O chumbo da galena (PbS), o zinco da esfalerite (ZnS) e o cobre na forma de calcopirite (CuFeS<sub>2</sub>), covelite (CuS), calcosina (Cu<sub>2</sub>S) e outros, são exemplos de metais encontrados em sulfuretos maciços.

Quando a solução hidrotermal ascende lentamente através da crosta, arrefece muito devagar. Nestas condições, os minerais dissolvidos são gradualmente precipitados a partir de uma solução que embebe vastos volumes de rocha, não se concentrando suficientemente para criar minério. Pelo contrário, se a solução flui rapidamente, por exemplo através de uma fractura ou de uma região mais porosa e permeável, entra em contacto com condições físicas e químicas distintas e o arrefecimento pode ocorrer em intervalos temporal e espacial relativamente curtos. O resultado é a precipitação rápida e a concentração de um depósito mineral. Outros efeitos como uma descida rápida de pressão, modificações da composição da solução causadas por reacções com as rochas adjacentes ou arrefecimento por mistura com água do mar, podem causar também precipitação rápida e formar depósitos concentrados. Tal como uma câmara magmática, um corpo rochoso plutónico em arrefecimento pode ser fonte de calor e fonte de soluções hidrotermais.

Se os metais precipitam em fracturas formam-se veios hidrotermais com elevada concentração de metal, que podem ter espessuras variáveis entre 1mm e vários metros. Se o metal se espalhar e precipitar nos poros da rocha, podem criar-se depósitos muito extensos mas com minério disseminado (com baixo grau de concentração). Muitas vezes encontram-se conjuntamente veios e depósitos disseminados. Os veios são explorados primeiro e quando se esgotam exploram-se os depósitos disseminados.

A actividade hidrotermal ocorre também em zonas de subducção, onde metais podem ser refundidos na placa oceânica descendente, dissolvidos em fluidos quentes (250-500°C) e ascender com eles para se depositarem preenchendo fracturas da placa sobrejacente. Este modelo foi proposto para explicar uma das fontes economicamente mais importantes de metais do mundo, depósitos minerais dispersos em fracturas finas e muito densas que afectam grandes volumes de rochas ígneas porfíricas.

## 5.4.2 *Processos magmáticos*

A actividade magmática origina diferentes tipos de depósitos. As composições minerais específicas e o tipo de rochas dependem da constituição química do magma, do ambiente geológico local e das propriedades dos minerais. Muitos minérios estão associados a rochas ígneas. Os mais importantes incluem a galena (PbS), a esfalerite (ZnS), o sulfureto de mercúrio – cinábrio (HgS).

Os tipos mais comuns de depósitos minerais formados por processos magmáticos são: 1) pegmatitos; 2) intrusões bandadas; 3) kimberlitos.

### 5.4.2.1 Pegmatitos

Pegmatitos são rochas com textura peculiar, caracterizada por desenvolvimento preferencialmente euédrico dos minerais componentes, que podem atingir dimensões invulgares (cristais com mais de 10m de comprimento). São ocorrências pouco comuns, que se formam em conjugação com um magma em arrefecimento a altas pressões. Quando um magma cristaliza, os cristais que se formam primeiro incorporam preferencialmente os elementos que cabem mais facilmente nas suas estruturas cristalinas. Isto significa que à medida que a cristalização prossegue, o líquido remanescente enriquece em outros elementos, mais raros – os que não cabem facilmente nas estruturas cristalinas dos minerais que formam a maioria do corpo rochoso em cristalização, e contém elevado teor em água e voláteis. Tipicamente estes elementos têm raio iónico grande – como o urânio – ou densidade superficial de cargas elevada – como o nióbio ( $\text{Nb}^{5+}$ ). A solidificação dos minerais remanescentes a partir de voláteis muito fugazes, produz uma rocha ígnea designada pegmatito, altamente enriquecida nos elementos que se concentraram na fracção residual do líquido magmático. Os pegmatitos possuem geralmente grão grosseiro, em parte porque o magma arrefece muito devagar neste estágio, havendo portanto tempo para o crescimento de grandes cristais e em parte porque a água e os voláteis dos quais se exsolvem estes grandes cristais estão também concentrados na última fracção do líquido magmático. Os pegmatitos são compostos principalmente por quartzo e feldspato (importante para a indústria cerâmica) mas contêm habitualmente concentrações importantes de elementos como o lítio, berílio, célio, boro, urânio e nióbio. Exemplos de minerais raros explorados em pegmatitos incluem as turmalinas (usadas como gema e em equipamento de rádio) e o berilo, um silicato de berílio e alumínio ( $\text{Be}_3\text{Al}_2(\text{Si}_6\text{O}_{18})$ ) cuja variedade verde escura é a esmeralda, uma gema muito apreciada; o berilo é a fonte do elemento metálico berílio.

#### 5.4.2.2 Intrusões bandadas

Em certas condições, o magma intruído solidifica em profundidade formando grandes corpos rochosos designados por intrusões bandadas. Trata-se de corpos de rochas plutónicas de composição basáltica que, embora sejam inteiramente de origem magmática, se assemelham do ponto de vista geométrico a rochas sedimentares bandadas ou estratificadas. Quando o magma arrefece em profundidade, não solidifica integralmente de uma só vez: os minerais com ponto de fusão mais elevado cristalizam primeiro e os de ponto de fusão mais baixo, depois. Os sólidos são tipicamente mais densos que o líquido remanescente e tendem a descer na câmara, depositando-se no fundo. Origina-se assim, em condições favoráveis, uma separação física dos minerais em cristalização, que são concentrados por gravidade numa câmara magmática em arrefecimento. De acordo com a sua densidade em relação à do magma, os cristais recém-formados podem afundar-se ou flutuar à medida que cristalizam, em vez de permanecer suspensos no líquido silicatado em arrefecimento, acumulando-se em leitos espessos onde ocorrem minerais específicos e associações minerais que ficarão concentrados em camadas separadas, com os minerais de ponto de fusão mais elevado no fundo e os de ponto de fusão mais baixo sucessivamente mais altos, o que facilita a sua exploração posterior.

Um exemplo interessante é o do crómio, o qual é abundante em magmas pobres em sílica ( $\text{SiO}_2$ ). O principal minério de crómio é a cromite – um óxido de ferro e crómio ( $\text{Fe Cr}_2\text{O}_4$ ), dos primeiros minerais a cristalizar a partir de magmas ricos de crómio. Tem densidade elevada (4.6) e muito maior que a do magma líquido (cerca de 3). Assim, cristais precoces de cromite afundam no magma e acumulam-se num nível na base da câmara que enriquece em cromite. A intrusão de Bushveldt (África do Sul), que ocupa uma área superior a  $110000\text{km}^2$  e tem cerca de 7km de espessura, é a fonte de 98% das reservas mundiais de crómio, explorando-se igualmente platina, metal com afinidade geoquímica com o crómio e que se pode concentrar pelas mesmas razões.

Um processo mais invulgar deu origem à intrusão bandada que ocorre no complexo de Sudbury, em Ontário (Canadá), o qual contém a maior concentração de níquel conhecida no mundo. Neste caso, um processo de deposição algo diferente levou à formação do minério niquelífero. Certos magmas separam-se abaixo de uma temperatura crítica – como o petróleo e a água – em duas fases líquidas imiscíveis, uma de composição sulfuretada e outra de composição silicatada. Os líquidos sulfurosos, que tipicamente são ricos em cobre, níquel e outros metais, afundam na câmara magmática porque são mais densos que as fracções silicatadas. Após arrefecimento e cristalização total, o maciço ígneo resultante possui concentrações de minério de cobre e níquel na base.

### 5.4.2.3 Kimberlitos

Um kimberlito consiste numa longa e estreita chaminé de rocha ígnea, vertical, com diâmetros até 200m que se origina em profundidade no manto, a 150-200km. Como e porque é que o magma kimberlítico se forma permanece um enigma; o que se sabe é que ele sobe explosivamente à superfície, originando uma abertura circular na crosta e arrastando consigo fragmentos de rocha mantélica (xenólitos). Um dos minerais constituintes desses fragmentos mantélicos trazidos à superfície é o diamante. O diamante é um mineral de alta pressão (cerca de 50 000 vezes superior à pressão atmosférica) e temperatura (1000°C), formado por carbono puro a profundidades superiores a 150km. A única forma de os diamantes alcançarem a superfície da Terra é através das chaminés kimberlíticas. Os diamantes são valorizados pela sua beleza, raridade, elevado índice de refração e por serem a substância natural mais dura. São classificados em gemas e diamantes industriais. Os primeiros são usados em joalharia e responsáveis por cerca de 90% dos proventos obtidos com estes minerais. Os segundos são usados em maquinaria diversa (nomeadamente abrasiva e de corte) e em electrónica. Os diamantes industriais representam cerca de 75% da produção de diamantes naturais, a qual não é suficiente para satisfazer a procura. Recorre-se, assim, desde 1953, ao fabrico de diamantes industriais, sintéticos. O fabrico de diamantes-gema artificiais é igualmente possível mas o seu custo duplica o das gemas naturais.

### 5.4.3 *Processos metamórficos*

As transformações mineralógicas causadas pelo calor ou pressão do metamorfismo podem igualmente produzir depósitos minerais com interesse económico. Os minérios metálicos mais comuns nas rochas metamórficas são formados por metamorfismo de contacto. Este fenómeno, que consiste essencialmente na recristalização mas também inclui modificações restritas do quimismo de rochas encaixantes, frias, adjacentes a corpos magmáticos quentes, intrusivos, define uma orla de metamorfismo distinta do ponto de vista mineralógico, gerada a temperatura elevada mas pressão muito baixa. Os depósitos de minério são particularmente comuns no contacto de líquidos magmáticos com rochas calcárias, porque estas são quimicamente mais reactivas que outras, mais ricas em quartzo. O intenso calor magmático decompõe o calcário, libertando dióxido de carbono, um volátil que actua como fluido de transporte de alguns elementos e participa activamente em algumas reacções metassomáticas.

O metamorfismo regional – transformação metamórfica de grandes extensões rochosas como resultado de altas T e P associadas a movimentos tectónicos

---

das placas crustais – pode também originar depósitos minerais. Em resposta às pressões diferenciais que ocorrem durante este tipo de metamorfismo, os minerais em recristalização frequentemente crescem concentrados em bandas lenticulares ou elipsoidicas, de composição alternada, definindo uma foliação. Uma grande variedade de minerais não metálicos com interesse económico ocorre em rochas metamórficas foliadas. Entre estes destacam-se as micas, os asbestos (silicatos fibrosos formados por metamorfismo de rochas ígneas ricas em minerais ferromagnesianos, com adição de água), a grafite, a vermiculite e algumas gemas.

A recristalização de rochas parentais monominerálicas, nomeadamente de calcários, em ambiente de metamorfismo regional, pode gerar importantes jazidas de mármore. Entre estes, os mármore brancos puros (branco estatúria) de Vila Viçosa ou de Carrara (Itália), são ocorrências raras e muito procurados pelos escultores e por um número restrito de compradores suficientemente abastados para suportar o elevadíssimo preço de venda de blocos deste material. Os mármore de Carrara resultaram da recristalização metamórfica de agregados porosos de conchas e outros materiais calcíticos, tendo o processo de recristalização eliminado todos os traços dos fósseis originais, resultando mármore cristalinos compostos inteiramente de grãos de calcite.

#### 5.4.4 *Processos sedimentares*

Uma grande variedade de minérios ocorre em rochas sedimentares em todo o mundo. Os exemplos mais importantes incluem urânio no Novo México, chumbo e zinco no SW do Missouri, ouro na Califórnia e Colorado, titânio na Flórida, cobre na Alemanha, estanho na Indonésia e alumínio (solo bauxítico) nas regiões tropicais húmidas do Brasil, África Central e Índia. A formação de cada uma destas ocorrências deve-se a diferentes processos, de natureza química ou física.

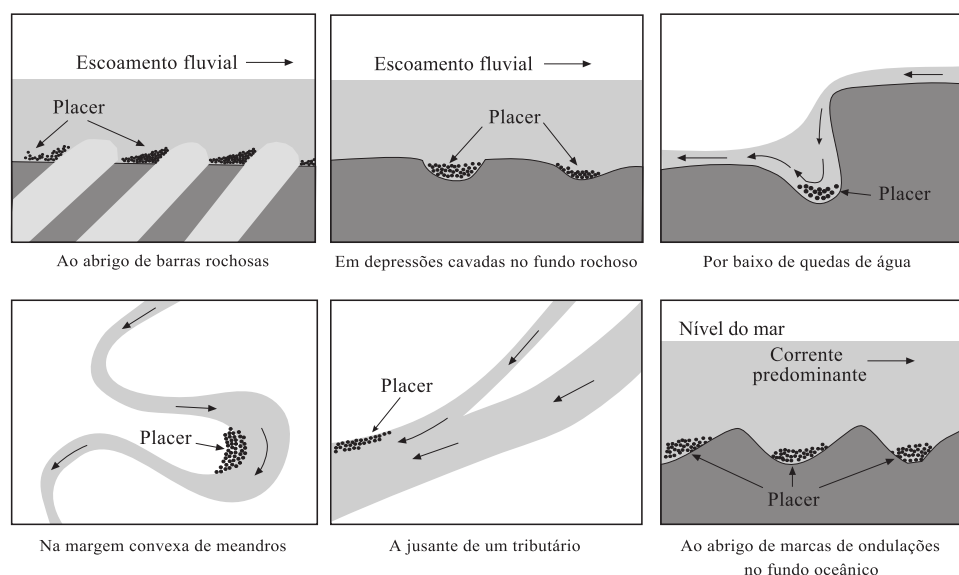
As rochas sedimentares são também a principal fonte dos recursos minerais não metálicos, incluindo rochas ornamentais, areia e cascalho, argila, rochas fosfatadas e enxofre.

##### 5.4.4.1 *Concentração mecânica – os placers*

Um placer é uma concentração sedimentar natural de partículas detríticas, constituídas por metal nativo (como ouro) ou minerais pesados, densos (como os diamantes) cuja acumulação e concentração resulta de segregação mecânica

pelas correntes (nomeadamente fluviais) ou pela ondulação marinha. Os placers mais comuns incluem minerais como o ouro, a platina, a cassiterite ( $\text{SnO}_2$ ), os diamantes e diversas pedras preciosas e semi-preciosas (rubi, esmeralda e safira). O conceito-chave para a formação de placers é o da densidade: todos os minerais assim concentrados são mais densos (densidade entre 3,5 – diamante – e 19 – ouro) que os outros minerais mais abundantes como quartzo e feldspato (com peso específico inferior, de cerca de 2,7) e que formam a maioria absoluta da carga detrítica em transporte num troço fluvial ou em ambiente marinho. Esta diferença permite às correntes e ondas separar fisicamente os minerais de acordo com o seu peso específico, favorecendo o transporte e a remobilização dos minerais menos densos, que viajam mais facilmente enquanto os mais densos são preferencialmente retidos e concentrados como depósitos residuais.

Os placers fluviais formam-se quando a água corrente, que transporta partículas sedimentares de tamanhos e composição (peso específico) diferentes, perde velocidade; nestas condições, parte do sedimento deposita-se – as partículas maiores e as que, ainda que de calibre inferior possuam maior peso específico (como os balastos e o ouro por exemplo) – enquanto as restantes partículas sedimentares continuam em trânsito, até que nova diminuição da velocidade de escoamento permita a repetição do processo de deposição selectiva, mas agora envolvendo tamanhos e densidades menores. O abrandamento da corrente é originado pela passagem por um meandro, pela existência de uma obstrução ao escoamento ou quando um curso fluvial desagua num corpo aquoso de maiores dimensões (Fig. 5.6).



**Figura 5.6 –** Formação de placers.

Os placers que ocorrem em praias são semelhantes aos de rio, mas formam-se de forma diferente. Tipicamente, a carga sólida transportada pelos rios, é debitada na linha de costa, onde se deposita nas praias e fica sujeita à acção das ondas e das correntes de deriva litoral<sup>4</sup> que continuamente separam o sedimento por densidades. A magnetite e a ilmenite (minério de ferro e minério de titânio) são encontradas actualmente com frequência nas nossas praias, mas existem placers antigos em antigos depósitos fluviais e de praia.

A tabela 5.6 mostra os minerais mais comuns em placers e a sua utilização. Um dos placers mais interessantes é o de ouro. Este metal foi usado desde cedo pelo Homem, tendo sido encontrados no Egipto objectos de ouro manufacturados há mais de 5000 anos. Através da História, o ouro foi usado como padrão monetário e moeda e o seu valor absoluto nos mercados, sempre elevado, resistiu através dos tempos de guerra, inflação e depressão. Pela sua beleza, fácil moldagem e elevado valor, a maioria deste metal é utilizado em joalheria. Mas o ouro tem igualmente outras propriedades que o tornam útil para muitos outros fins. É muito pouco reactivo, não se combina com o oxigénio, o enxofre ou outros elementos (como acontece com outros metais) e portanto resiste à corrosão. É por isso utilizado em circuito electrónicos, computadores, equipamento de comunicação, foguetões e motores de avião. Apresenta elevada capacidade reflectora de radiação e protege astronautas, satélites e componentes electrónicos de danos resultantes da exposição a raios X e raios cósmicos no espaço. Os placers de ouro são tipicamente muito concentrados neste metal pois este tem uma densidade de 19, que excede largamente a de qualquer outro mineral denso e susceptível de concentração sedimentar (à excepção da platina cuja densidade é 17). Como a água corrente separa as partículas (e concentra-as) de acordo com a sua densidade, só excepcionalmente ocorre sedimentação conjunta de minerais com densidades mais baixas (3-6). Embora do ponto de vista da densidade fosse possível encontrar uma associação natural de platina e ouro num mesmo placer e apesar de ambos terem génese primária em rochas ígneas, a primeira ocorre associada a rochas pobres em sílica e o segundo a rochas ricas neste mineral. Assim, o mesmo curso fluvial teria de drenar vastos afloramentos de ambos os tipos de rochas para concentrar ouro e platina num mesmo depósito – uma ocorrência não impossível mas muito pouco provável. A maioria dos minerais placer é resistente do ponto de vista mecânico e pouco reactiva quimicamente. Estas características permitem-lhes resistir durante a meteorização e ao transporte a distâncias variáveis da área fonte.

<sup>4</sup> As correntes de deriva litoral são originadas pela incidência oblíqua das ondas no litoral. Esta corrente é responsável pelo transporte de sedimentos ao longo da linha de costa, constituindo os sedimentos transportados a deriva litoral.

**Tabela 5.6 – Minerais mais comuns em placers e sua utilização.**

Mineral	Peso específico	Fórmula química	Uso
Olivina	3,3	MgSiO <sub>4</sub>	Pedra semi-preciosa
Diamante	3,5	C	Pedra preciosa
Topázio	3,5	Al <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> (F,OH) <sub>2</sub>	Pedra semi-preciosa
Granada	3,5-4,3	Fe <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> Si <sub>3</sub> O <sub>12</sub>	Pedra semi-preciosa, abrasivos
Corindo	4,0	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Pedra preciosa (rubi, safira)
Rútilo	4,2	TiO <sub>2</sub>	Pigmento de tintas
Ilmenite	4,7	FeTiO <sub>3</sub>	Fonte principal do titânio – aços
Zircão	4,7	ZrSiO <sub>4</sub>	Pedra semi-preciosa
Magnetite	5,2	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Minério de ferro
Cassiterite	7,0	SnO <sub>2</sub>	Minério de estanho
Cinábrio	8,1	HgS	Minério de mercúrio
Prata	10,5	Ag	Joalheria, películas fotográficas, espelhos, revestimentos, talheres e outros utensílios
Platina	17,0	Pt	Joalheria, equipamento eléctrico, catalizadores
Ouro	19,0	Au	Joalheria, moedas, ligas, revestimentos, medicina dentária

#### 5.4.4.2 Precipitação química

##### *Evaporitos*

A forma mais directa de concentrar minerais sedimentares é através da vaporização da água de lagos ou do mar. Os solutos minerais que precipitam como consequência da sobre-saturação ou evaporação total designam-se por depósitos evaporíticos<sup>5</sup>.

A evaporação da água em meio terrestre pode ocorrer quando esta fica aprisionada em bacias de drenagem fechadas (endorreicas) de que os Lagos Salgados do continente americano são exemplo. Exemplos de sais que precipitam a partir de águas lacustres são o carbonato de sódio (NaCO<sub>3</sub>), o sulfato de sódio (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) e o borax (Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>).[10H<sub>2</sub>O] os quais são usados na produção de papel, sabão, detergentes, anticépticos e químicos vários.

Muito mais comuns e importantes que os anteriores são os evaporitos marinhos, concentrados por evaporação da água do mar. A evaporação pode ocorrer quando mares epicontinentais ou interiores, pouco profundos têm ligação deficiente com os oceanos dificultando as trocas de massa entre estes dois

<sup>5</sup> Vide “Rochas salinas (ou evaporitos)” no volume n.º 93, *Morfogénese e Sedi-mentogénese*.

corpos aquosos ou quando uma depressão de maré costeira, pouco profunda se separa da bacia oceânica alimentadora por interposição de um recife ou qualquer outra barreira impermeável. Os sais mais importantes que precipitam a partir da água do mar reflectem a sua composição e são o gesso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), a halite ( $\text{NaCl}$ ) e a carnalite ( $\text{KCl} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ). A halite é o sal comum das cozinhas (utilizado em culinária e indispensável ao equilíbrio do organismo humano), também usado para fundir o gelo e a neve nas vias de comunicação dos países frios; o gesso é utilizado em materiais de construção (incluindo o estuque) e o potássio usado em fertilizantes. Quando os depósitos evaporíticos antigos são cobertos por outros sedimentos, aqueles, menos densos, deformam-se plasticamente, fluem através dos níveis superiores mais densos, formando, como já referimos anteriormente, domas de sal, em estruturas designadas por intrusões diapíricas.

### *Fosfatos*<sup>6</sup>

Os depósitos sedimentares de minerais fosfatados que são a fonte primária do fósforo dos fertilizantes, são formados como resultado da precipitação da apatite [ $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH},\text{F})$ ] a partir da água do mar. As águas superficiais do oceano têm baixo teor em fósforo porque os peixes e outros animais marinhos extraem-no para construir as suas estruturas esqueléticas. Quando os animais morrem e afundam no oceano, os seus tecidos decompõem-se lentamente e libertam este elemento para a água profunda. Estas águas, comparativamente ricas em fósforo, são transportadas para a superfície por correntes de “upwelling” (afloramento costeiro) e pode ocorrer precipitação da apatite sob uma forma microgranular a maciça, conhecida por colofano. Os sedimentos ricos de fósforo formam-se hoje em dia mas este processo foi muito mais comum no passado, quando mares pouco profundos inundaram grandes porções de continentes, pelo que a maioria dos depósitos fosfatados sedimentares correspondem a rochas antigas.

A apatite pode igualmente ser neoformada a partir de substâncias ricas de fósforo tais como excremento de aves e ossos, por exemplo.

### *Depósitos sedimentares bandados*

Certos minerais podem precipitar devido a modificações químicas de grande escala das águas hospedeiras de elementos inicialmente estáveis em solução, que incluem, por exemplo, alterações dramáticas do pH ou Eh da água ou adição maciça de certos iões. É o que acontece com os depósitos das mais importantes concentrações sedimentares de ferro do mundo e que são designados BIF – Banded Iron Formation (também conhecidos por taburitos

<sup>6</sup> Vide “Rochas fosfatadas (ou fosforitos)” no volume n.º 93, *Morfogénese e Sedimentogénese*.

---

no Brasil). Consistem em sedimentos muito antigos, com alguns milhares de milhões de anos de idade, ricos em ferro sob a forma de hematite ou magnetite, que se concentra em bandas vermelhas, intercalados em estratos também sedimentares, mas siliciosos de cor clara (como o cherte, por exemplo) ou, mais raramente, carbonatados. Originaram-se através de precipitação química em ambiente marinho e pensa-se estarem relacionados com o desenvolvimento do oxigénio na atmosfera terrestre. Efectivamente, em ambientes redutores, pobres em oxigénio, o ferro (na forma  $\text{Fe}^{2+}$ ) dissolve-se facilmente na água mas se a concentração de oxigénio aumentar, o ferro, oxida facilmente ( $\text{Fe}^{3+}$ ) e precipita rapidamente como  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . No início da história da Terra, a atmosfera continha muito pouco oxigénio livre, molecular e, como resultado, grandes quantidades de ferro resultantes da meteorização das rochas magmáticas continentais foram removidas, transportadas e dissolvidas no oceano na sua forma reduzida. Com o aparecimento, a evolução e aumento da abundância dos organismos fotossintéticos, a concentração de oxigénio na atmosfera aumentou e, há cerca de 2,6 mil milhões de anos, existia já oxigénio suficiente na atmosfera para interagir significativamente com o oceano e, conseqüentemente, promover a oxidação do ferro dissolvido; como resultado, grandes quantidades de ferro precipitaram num intervalo de tempo limitado, produzindo os BIF.

Também alguns dos mais importantes minérios de chumbo, zinco e cobre podem ocorrer intercalados em rochas sedimentares. A galena, a esfalerite, a calcopirite e a pirite podem ocorrer em níveis finos e regulares, paralelos a estratos sedimentares. Estes depósitos formam-se a partir de soluções hidrotermais que invadem maciços rochosos estratificados onde encontram condições químicas ambientais diferentes que promovem a precipitação destes elementos. O urânio que ocorre em rochas sedimentares (já referido no capítulo anterior) ilustra bem como as modificações das condições químicas podem formar depósitos de minério. O urânio concentra-se nas fases tardias da cristalização magmática e assim, a água da subsuperfície pode tornar-se nele enriquecida. Se esta água se infiltrar num arenito contendo muito carvão ou restos vegetais fermentados (como os resíduos de um fogo florestal, por exemplo) o urânio precipita como um mineral amarelo – a carnotite. Depósitos extensos de carnotite formados deste modo há cerca de 180 milhões de anos, ocorrem em arenitos no Oeste americano e em vastas extensões da ex União Soviética. Parte substancial do urânio explorado em Portugal foi-o também em depósitos sedimentares, onde este elemento se encontra naturalmente concentrado.

#### 5.4.5 Meteorização – Depósitos de minerais residuais

A meteorização química conduz à concentração de minerais através da solubilização, hidrólise e remoção selectiva de compostos mais solúveis de

---

um maciço rochoso em alteração. Os solutos são carreados pelas soluções de infiltração e pelo escoamento superficial, deixando para trás uma concentração de minerais menos solúveis – material residual.

Um exemplo de depósitos formados através de concentração residual são os lateritos, que correspondem a perfis de solos formados em condições de elevada precipitação, em clima tropical quente, com alternância de estação seca (curta) e húmida. Nestas regiões, os minerais solúveis em água são lentamente e inexoravelmente lixiviados do solo. Na medida em que o ferro é um dos elementos menos solúveis, o processo de lixiviação total do perfil de alteração gera uma coluna alterada enriquecida em argila e ferro e endurecida, um “chapéu de ferro”, maioritariamente formado por hematite. Alguns lateritos são também enriquecidos em níquel, se a rocha subjacente em alteração o contiver na sua composição.

Embora os lateritos ricos em ferro sejam de longe os depósitos residuais mais comuns, as laterites aluminosas designadas bauxites, são os mais importantes e únicas fontes de minério de alumínio explorável com rentabilidade, formadas da mesma forma em condições climáticas idênticas. O alumínio é largamente usado como um material estrutural porque é leve e resistente à corrosão; também é usado em muitos outros produtos, como na indústria automóvel, cosmética e aromática (desodorizantes) e mobiliário.

#### 5.4.6 *Recursos minerais dos oceanos actuais*

Alguns dos processos de formação de recursos minerais descritos anteriormente ocorreram em oceanos antigos entretanto desaparecidos. Mas a formação destas concentrações minerais ocorre igualmente hoje em dia neste mesmo ambiente. A água do mar contém uma variedade de constituintes químicos além dos sais comuns (como o cloreto de sódio). Alguns dos elementos em solução na água do mar, tais como o magnésio, são economicamente extraídos dela como subprodutos da exploração da halite e de outros evaporitos. Um processo comum de formação de minério associado com os oceanos é a concentração de sulfuretos por processos hidrotermais nas vizinhanças das cristas médias oceânicas. Em muitos locais, a quantidade de material que está hoje a acumular-se é muito pequena e a coluna de água é tão espessa que tornaria a exploração proibitiva do ponto de vista económico. Contudo, algumas vasas do Mar Vermelho ricas de metais contêm concentrações suficientes de metais como o Cu, Pb e Zn, que justificam dragagens de prospecção e muitas companhias mineiras encaram seriamente a possibilidade de explorar esses sedimentos. Do mesmo modo, ao longo de uma secção da crista de Juan de Fuca, ao largo da costa de Oregon e Washington, centenas de milhares de toneladas de

---

sulfuretos de Zn e prata podem já ter-se depositado e a actividade hidrotermal continua activa, pelo que também esta região tem sido objecto de atenção especial das empresas mineiras.

Um dos mais promissores depósitos minerais dos fundos oceânicos é, simultaneamente, o menos entendido. Sabe-se hoje que largas superfícies do fundo oceânico estão cobertas por nódulos (concentrações centimétricas a decimétricas, semelhantes a nozes), constituídos por óxidos de manganês, ferro, cobalto, níquel e cobre. Cada nódulo é formado por níveis concêntricos de metal em volta de um núcleo (espinha, dente de peixe ou fragmento de rocha). Colectivamente, são usualmente referidos na literatura como nódulos de manganês porque tipicamente contém 10 a 35% de manganês e ferro (a que acrescem 0,2 a 2,5% de Cu, Ni e Co, juntamente com vestígios de Ti, Al, Mo, Pb, Sr, Pt e outros metais). São encontrados no fundo do oceano, em regiões onde as taxas de sedimentação são suficientemente baixas para não os soterrar, como no Oceano Pacífico. A fonte dos metais e o processo pelo qual os nódulos se formam são ainda controversos. A fonte mais provável corresponde a material inicialmente meteorizado dos continentes e transportado pelos rios e correntes para os fundos oceânicos onde precipita sob a forma nodular. Teorias alternativas sugerem que o material dos nódulos pode resultar de vulcanismo oceânico secundário ou ainda de processos bioquímicos, perto da interface água-sedimento no fundo oceânico. Os estudos preliminares mostram que a exploração do fundo do oceano pode ser tecnicamente possível e rentável mas pouco se conhece acerca do impacto ambiental associado.

### **5.5 Procura futura e oferta de minerais a nível mundial**

Pode afirmar-se que à escala global, o Homem explora actualmente a generalidade dos recursos minerais muito intensivamente. No entanto, qualquer projecção do “tempo de vida” das reservas minerais deve assentar sobre certos pressupostos, sendo um deles a procura futura, que, por razões referidas anteriormente, pode flutuar positiva ou negativamente e nem todos os minerais seguirão a mesma tendência. A tabela 5.7 lista as projecções do tempo de vida de alguns minerais à escala mundial, assumindo: procura constante, ao nível da produção de 1992 (isto é, reservas estáticas) ou crescimento exponencial da procura (reservas exponenciais). Como se pode observar, as reservas projectadas da maioria dos metais, durarão apenas algumas décadas mesmo considerando consumo invariável no tempo. Também 80% das reservas de Au, Ag, Hg, Pb, Se, e W estarão consumidas antes de ou até 2040.

**Tabela 5.7** – Reservas identificadas e máximas, estáticas e exponenciais de alguns metais. As reservas máximas incluem depósitos marginalmente económicos e sub-económicos, minérios de baixo teor. As reservas exponenciais foram calculadas assumindo as taxas de crescimento referidas na tabela 5.1.

Metal	Duração das reservas identificadas (anos)		Duração das reservas máximas (anos)	
	Estáticas	Exponenciais	Estáticas	Exponenciais
Alumínio	224	99	2238	160
Cobre	41	23	66	33
Ferro	167	66	236	78
Chumbo	22	11	37	18
Níquel	65	36	144	56
Estanho	21	16	21	16
Zinco	21	17	42	30

Note-se que quando se assume variação exponencial da procura de um mineral (um pressuposto mais realista), as respectivas reservas durarão menos do que utilizando o pressuposto de procura constante (Tabelas 5.7 e 5.8). No exemplo referido na tabela 5.8, os stocks disponíveis correspondem a reserva estática suficiente para 500 anos mas apenas justificam uma reserva exponencial de aproximadamente 80 anos.

Como já referimos, as reservas minerais podem aumentar com o tempo. Se assumirmos novamente uma procura para determinada substância de 100 ton/ano e o mesmo crescimento (3,5%/ano), mas que as reservas aumentam de 50 000 para 500 000 ton, as reservas estáticas crescem de 500 para 5000 anos mas as exponenciais aumentam apenas de 83 para 147 anos. Em condições realísticas – onde a procura de um certo mineral cresce continuamente – o aumento da quantidade disponível desse mineral em cerca de 10 vezes é insuficiente para duplicar a esperança de vida do stock. Os exemplos reais listados na tabela 5.7 mostram que a procura é já actualmente tão elevada que quer consideremos as reservas como estáticas ou exponenciais, ou usemos estimativas mais conservativas ou liberais dos stocks remanescentes, as quantidades conhecidas de certos minerais poderão esgotar-se num horizonte temporal de apenas algumas décadas.

**Tabela 5.8** – Exemplo hipotético do efeito da procura exponencial nas reservas, admitindo uma taxa de crescimento da procura de 3,5%/ano.

Tempo	Stock disponível (ton)	Procura (ton/ano)	Reservas estáticas (anos)
Início	50 000	100	500
Após 20 anos	47 000	200	235
Após 40 anos	41 000	400	103
Após 60 anos	29000	800	36
Após 80 anos	5 000	1600	3

Estas projecções consideram uma distribuição não restritiva, ou seja, que os minerais podem ser usados quando e onde necessários, independentemente de condições políticas ou de outros factores sociais e económicos. Um artigo publicado em 1984 na revista *Science*<sup>7</sup> discute a disponibilidade de 67 elementos comercialmente importantes, tendo os autores previsto que o Fe, o Al, o Cr e o Ni, por exemplo, seriam ainda abundantes em 2100 (Tabela 5.9). No entanto, quando as reservas actuais se aproximarem da exaustão, a lei da oferta e da procura fará subir os preços. Este facto, por sua vez, transformará recursos actualmente sub-económicos em económicos e alguns destes depósitos serão reclassificados como reservas, possibilitando a exploração rentável de depósitos de mais baixo teor. Os melhoramentos expectáveis nas tecnologias de localização, de extracção e de processamento, podem conduzir ao mesmo resultado: por exemplo, a descoberta de que o metabolismo de certas algas consegue ligar iões de ouro, permitirá às companhias mineiras recuperar este metal do que actualmente são os resíduos estéreis das minas ou mesmo de águas naturais. Os avanços tecnológicos necessários à rentabilização de alguns recursos sub-económicos podem, contudo, não ser atingidos em tempo útil.

<sup>7</sup> Goeller, H. E. e Zucker, A. (1984), *Infinite Resources. The ultimate strategy*. Science, 223, p. 456.

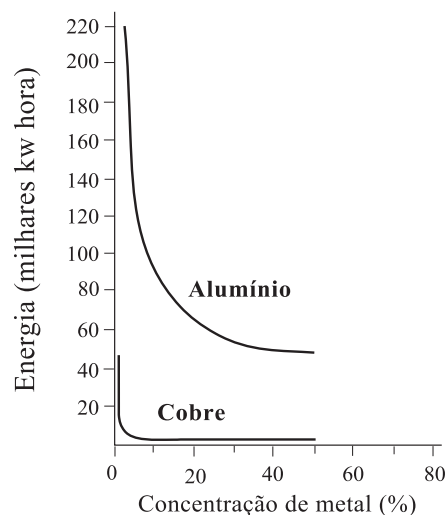
**Tabela 5.9** – Previsão da disponibilidade futura de elementos usados na indústria.

Disponibilidade	Metais	Não metais
Ilimitada	Sódio, magnésio, cálcio	Azoto, oxigénio, neon, argon, xenon, krypton, cloro, bromo, silício
Abundante	Alumínio, gálio, ferro, potássio	Enxofre, hidrogénio, carbono
Abundante se a tecnologia de extracção melhorar	Lítio, estrôncio, rubídio, crómio, níquel, cobalto, platina, paládio, ródio, ruténio, irídio, ósmio	Boro, iodo
Restrita em 2100	Ouro, prata, mercúrio, cobre, zinco, chumbo, arsénio, estanho, molibdénio, 22 outros metais	Hélio, fósforo, flúor

---

Por outro lado, a descoberta de novos depósitos minerais e, em particular, de um novo depósito com elevada concentração de um determinado minério, pode conduzir outras minas, com teores mais baixos, a tornarem-se não competitivas. A descoberta de novos depósitos significativos de minério será cada vez mais difícil. As províncias geológicas em terra foram já na sua maioria intensamente prospectadas e exploradas. O número de novas descobertas de depósitos extensos e/ou de elevado teor tem vindo a diminuir desde há alguns anos. Os depósitos de elevado teor que permanecem certamente por descobrir (em águas profundas, por exemplo) serão mais pequenos, menos acessíveis e implicam custos de exploração mais elevados. Explorar mais profundamente na crosta também não será uma alternativa imediata, visto que os depósitos minerais mais ricos se encontram preferencialmente nas regiões superiores da litosfera e os custos de mineração aumentam exponencialmente com a profundidade de laboração. A exploração de minério com baixo teor implica o processamento de maior quantidade de rocha e o aumento da superfície perturbada; mais material terá que ser processado nos fundidores, mais desperdícios serão produzidos nas minas e fundidores e a poluição associada aumentará. Por exemplo, para se obter uma quantidade de zinco equivalente ao fornecimento mundial anual, seriam necessários 80 mil milhões ton de rocha comum ou  $5 \times 10^{18}$  litros de água do mar, assumindo que os processos de extracção seriam 100% eficientes.

Também a quantidade de energia consumida para extrair metal de um depósito de baixo teor é maior; a figura 5.7 mostra a energia requerida para extrair e refinar 1 ton de Cu e 1 ton Al a partir de minério com diferentes concentrações. A produção de 1 ton de Cu a partir dos depósitos disponíveis no início deste século consome 3 vezes mais energia do que em 1978. E a energia é, efectivamente, um factor limitante do fornecimento de minerais. Qualquer  $\text{km}^3$  de rocha da superfície da terra contém toneladas de Al, Zn, Fe e Cu e se dispuséssemos de energia ilimitada e gratuita, nunca teríamos falta destes metais porque poderíamos extraí-los das rochas, do ar, do solo, da água e até dos aterros sanitários.



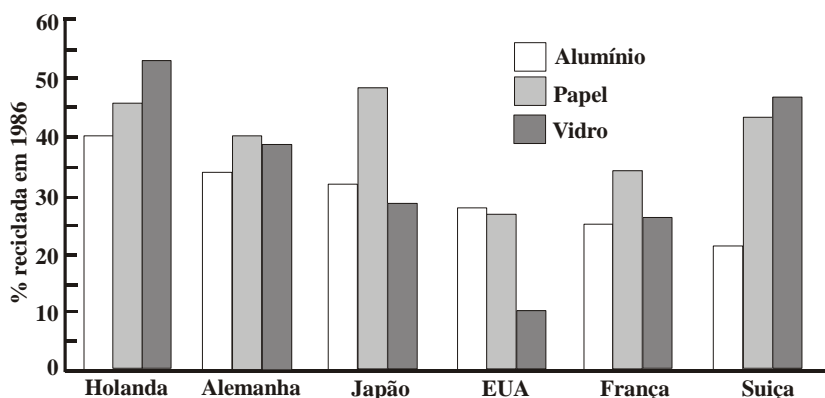
**Figura 5.7** – Variação da energia necessária para extrair e processar 1 ton de alumínio e cobre em função da concentração do metal no minério.

A economia ambiental indica que a poluição e a produção de resíduos limitarão o crescimento de forma mais efectiva do que a disponibilidade dos recursos. De facto, os efeitos da degradação ambiental e da poluição causadas pela exploração mineira e pelo refinamento subsequente podem levar ao abandono da exploração ainda antes do esgotamento. Dada a escassez de muitos minerais e os tremendos danos ambientais resultantes da sua exploração e processamento, alguns especialistas recomendam a diminuição significativa da procura de novas jazidas e o aumento da prática de reciclagem consistente e continuada de metais e de outros minerais. Por outras palavras, insistem na necessidade de concretização da “política dos três “R”” – reduzir, reutilizar, reciclar – e também na urgência de encontrar substitutos para os minerais com reservas pequenas.

## 5.6 Reciclagem

A reciclagem de materiais é, pois, cada vez mais importante. Entende-se por reciclagem a reutilização de materiais que são recolhidos, tratados e reprocessados no fabrico de novos produtos. Uma cidade da dimensão de S. Francisco (Califórnia, E.U.A.) rejeita anualmente mais Al do que o produzido numa exploração de bauxite de pequena dimensão e mais Cu do que o produzido por uma exploração mineira de cobre de dimensão média. Daí que a reciclagem integre já parte da economia de muitas nações desenvolvidas. A Áustria triplicou a taxa de reciclagem de Al nos últimos 10 anos e a Holanda recicla actualmente mais de 40% do Al, papel e vidro que utiliza.

A reciclagem é um processo geralmente muito eficiente. A reciclagem de Al consome 3 a 10% da energia necessária para extrair e processar uma quantidade equivalente a partir da bauxite (Tabela 5.10) reduzindo-se também a poluição atmosférica e hídrica e a produção de desperdícios. Ainda assim, apenas 1/3 do Al usado nos E.U.A. é reciclado (Fig. 5.8); em contrapartida aproximadamente 90% dos materiais empregues nos veículos automóveis americanos são reciclados, bem como quase todo o Pb das baterias. Os metais que são usados na sua forma pura e em peças de grande dimensão são mais fáceis de reciclar: chapas de chumbo, ferro e aço de automóveis, cobre de fios e tubagem, alumínio de canalizações e latas de bebidas, ouro e prata, por exemplo. Consequentemente, o chumbo e o cobre já são abundantemente reciclados, e o alumínio é um bom candidato para o aumento da taxa de reciclagem. Os artefactos contendo misturas de metais requerem separações dispendiosas, reduzindo a poupança e desencorajando a reciclagem. A platina, por exemplo é um metal raro, caro e difícil de extrair porque ocorre em baixas concentrações na Natureza. O elevado preço da platina sempre ditou a necessidade de uma elevada taxa de reciclagem, o que aconteceu até meados de 70, quando este metal era reciclado em mais de 85%. Contudo, a expansão dos catalizadores no sistema de escape dos automóveis mudou dramaticamente esta situação. Cerca de 60% da platina extraída é usada em joalharia, lingotes e contentores inertes/refractários na indústria e investigação química. A restante é usada em produtos químicos, catalizadores para automóveis e refinarias de petróleo. Enquanto a maioria daqueles produtos é reciclada quase integralmente, a taxa de reutilização da platina dos catalizadores de automóveis é apenas de 12% (Fig. 5.9). A razão principal reside na inexistência de um mecanismo efectivo de recuperação da platina dos catalizadores descartados, não por questões tecnológicas (a tecnologia consegue recuperá-la em cerca de 90%) mas por dificuldades na localização e colecção das peças nos cemitérios de automóveis, ferro velho, etc; os custos desta operação são tão altos que só se justificarão quando o preço da platina for mais elevado.



**Figura 5.8** – Percentagem de alumínio, vidro e papel reciclados em diversos países em 1986. Embora o papel não seja um recurso mineral mas sim biológico, inclui-se devido ao facto de ser uma das substâncias mais recicladas a nível municipal.

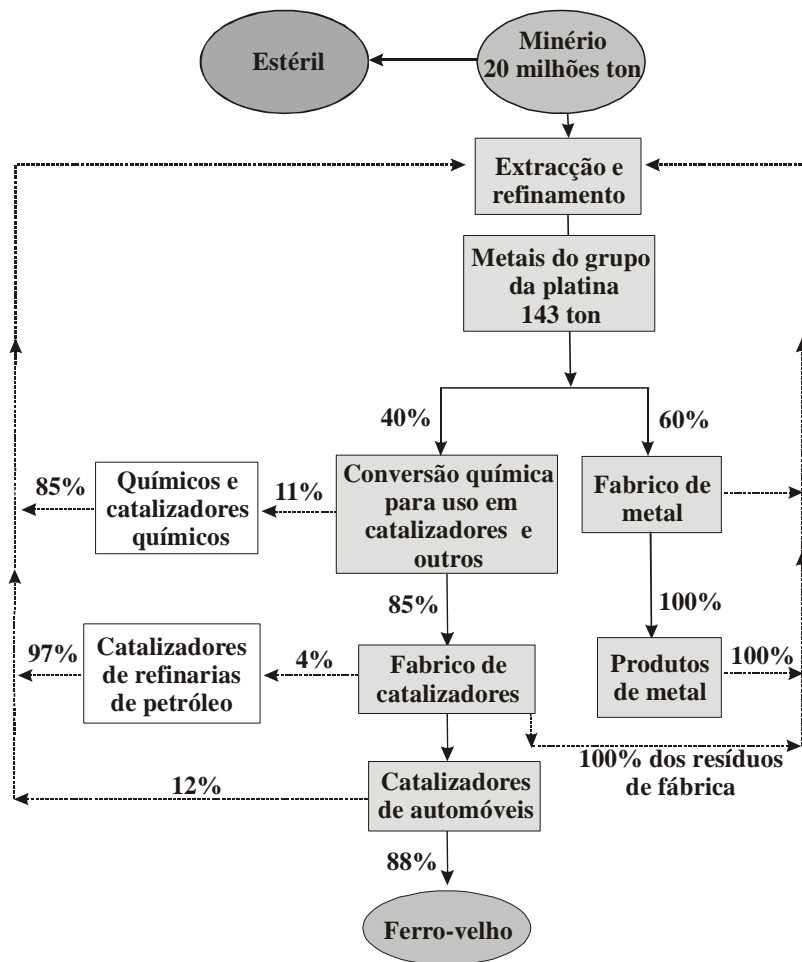


Figura 5.9 – Reciclagem da platina.

Tabela 5.10 – Energia necessária para fabrico de vários produtos a partir de matéria-prima e por reciclagem.

Produto	Energia requerida (MJ/kg)	
	Matéria-prima	Reciclagem
Vidro	25	25
Aço	50	26
Alumínio	250	8
Cobre	60	7
Papel	24	15

A reciclagem tem, contudo, limites práticos. O rendimento dos processos de recuperação é sempre inferior a 100% e uma taxa de 90% é virtualmente impossível de alcançar excepto no caso dos metais preciosos (como o ouro)

---

não reactivos (por isso resistentes à corrosão) e usados principalmente em joalheria ou outros produtos isentos de grande desgaste físico. A eficiência dos processos de reciclagem da maioria dos metais comuns raramente alcança 30% e as ligas apresentam problemas especiais. O aço, por exemplo, é uma mistura de ferro com um ou mais elementos e muitas vezes, a composição do aço é específica para cada aplicação. Adiciona-se crómio para obter aço inoxidável, titânio, molibdénio ou tungsténio para obter aços de alta resistência, etc. Se a composição da mistura é crítica para uma aplicação particular, não se pode alimentar uma unidade de reciclagem partindo de uma quantidade de peças de aço indiscriminadas. Cada tipo de aço deve ser reciclado individualmente e não existem muitas unidades de reciclagem preparadas para o fazer.

## 5.7 Substituição

Com o contínuo crescimento populacional, reciclar pode tornar-se uma prática insuficiente, sendo então necessário encontrar substitutos. A diminuição da disponibilidade de algodão, lã e borracha natural, por exemplo, levou já à sua substituição por materiais sintéticos, derivados do petróleo. No século XIX os materiais estruturais mais importantes eram o aço, o tijolo e a madeira, hoje substituídos por Al, fibra de vidro, cimento e plásticos. Com efeito, o plástico é a substância mais versátil e que mais minerais substituiu nos últimos 100 anos, embora recentemente se tenham encontrado numerosas aplicações para cerâmicas especiais.

Contudo, a substituição lida apenas temporariamente com a escassez dos metais ou de outras substâncias naturais. Não é uma solução para o aumento generalizado da procura e da escassez, porque, em última análise, também as reservas dos substitutos esgotar-se-ão elas próprias. Tem sido proposta a substituição de uma grande variedade e quantidade de metais por produtos plásticos, mas na sua maioria os plásticos derivam do petróleo, o qual é também um recurso não renovável, em exploração intensa e cujas reservas diminuem rapidamente.

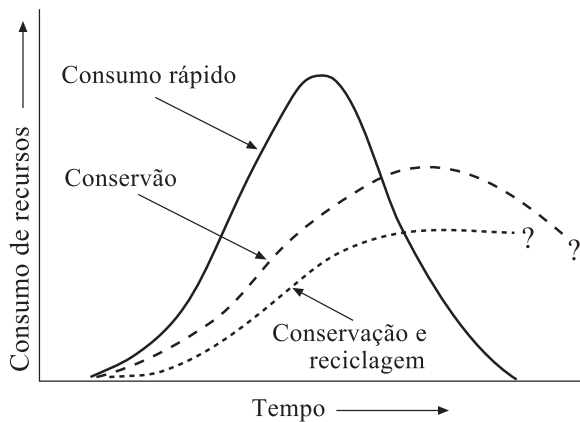
Certos elementos ou compostos têm propriedades únicas e a esperança de lhes encontrar um substituto é reduzida. A platina e outros metais usados como catalizadores nos processos industriais, o mercúrio, único metal líquido à temperatura ambiente e alguns elementos (como o Cu, Pb, Zn, Hg, Ni, Sn, Mn, Cr, Co e Ti) são absolutamente necessários, embora em quantidades diminutas, na metalurgia moderna. As perspectivas de desenvolver sistemas metalúrgicos totalmente inovadores com técnicas e matérias primas diferentes, parecem remotas.

---

Infelizmente, algumas substâncias que não têm um substituto imediato e apenas podem ser recicladas com baixa eficiência são também muito procuradas e têm fornecimento pequeno: o Ni e o Cr, usados no aço inoxidável, o Sn das soldas, o He empregue em sistemas de refrigeração ou o W incorporado em ligas refractárias. Talvez o melhor exemplo de tais substâncias seja o fósforo, essencial a todos os organismos e constituinte do DNA, das membranas celulares e dos tecidos ósseos de todos os vertebrados, entre outros – sem fósforo, a vida tal como a conhecemos, não existiria. O fósforo é um elemento fundamental nos fertilizantes e não tem nenhum substituto conhecido. É produzido comercialmente a partir de depósitos não renováveis e raros de rochas fosfatadas que se esgotarão rapidamente. O consumo de fosfatos aumenta 4%/ano (dados de 1990) e, embora as estimativas variem, as reservas conhecidas poderão esgotar-se em menos de 50 anos (estão projectadas durar até 2050), assumindo taxas de consumo e condições actuais. O fósforo é difícil de reciclar porque é usado de forma difusa em explorações agrícolas, o que torna quase impossível a sua recuperação. O fosfato que não é absorvido pelas plantas permanece disperso no solo ou é lixiviado, podendo alcançar linhas de água ou aquíferos (de que pode constituir um poluente importante, como já se referiu) e depois o mar, onde precipita. A única solução para este problema, no momento é a sua conservação, consumindo menos matéria-prima e adoptando práticas agrícolas que o retenham mais tempo nos solos a que foi adicionado.

## 5.8 Conservação e durabilidade

Tal como se passa com a energia, também a procura de recursos minerais pode ser reduzida por conservação (Fig. 5.10) consumindo-se estritamente o necessário e da forma mais eficiente. Uma maneira simples de o fazer é produzir bens concebidos para durar, fabricando produtos de melhor qualidade e utensílios susceptíveis de reparação ou modificação quando envelhecem, em vez da simples substituição por equivalente novo. No entanto, devido à evolução rápida da tecnologia, ao sistema económico e aos padrões culturais vigentes nos países consumidores, a tendência actual favorece a comercialização de bens menos duráveis, que podem e costumam ser substituídos por modelos mais avançados ou alternativos num período de alguns meses a anos e, por isso, a conservação será uma medida difícil de implementar em larga escala.



**Figura 5.10** – Consumo de recursos no futuro, considerando três cenários: continuação da situação actual (consumo rápido), conservação e reciclagem.

Outra estratégia consiste na redução da dimensão dos produtos, um conceito por vezes referido como desmaterialização. A miniaturização, como já acontece na electrónica, pode poupar quantidades substanciais de matéria-prima e de energia, com vantagens acrescidas, pois os componentes electrónicos miniaturizados produzem dispositivos mais velozes e mais poderosos (os computadores são disso um bom exemplo). No entanto, neste tipo de produtos não é muitas vezes economicamente rentável separar, concentrar, refinar e recuperar as pequenas quantidades dos vários metais intervenientes, que deixam assim de ser recicláveis.

## 5.9 Degradação ambiental devida à exploração mineira

Tal como os combustíveis fósseis, os minerais fazem parte de um sistema de produção/consumo que envolve prospecção, extracção, processamento, transporte e utilização. A exploração mineira é uma das actividades antrópicas mais devastadoras do ponto de vista ambiental, afectando muitos milhões de hectares de terra no mundo inteiro, poluindo alguns milhares de milhões de toneladas de ar e água e gerando quantidades comparáveis de resíduos sólidos, armazenados em escombrelas. A actividade mineira é também uma das profissões de maior risco, seguida pela agricultura e a construção civil.

A indústria mineira é um dos maiores consumidores de energia do Mundo. Em cada ano, aproximadamente 1% da energia mundial é consumida na produção de alumínio e mais de 5% no fabrico do aço. Muita desta energia provém da combustão de combustíveis fósseis ou de madeira, causando problemas ambientais já referidos anteriormente. São poucas as estatísticas

disponíveis acerca dos danos causados pela indústria mineira, embora muitas “áreas de desastre ambiental” bem conhecidas tenham resultado de operações de exploração e de processamento de minérios (Tabela 5.11). As indústrias mineiras podem contribuir directamente para a desflorestação; efectivamente, o carvão de madeira é um combustível usado em muitas operações mineiras, fabricado por combustão parcial da madeira obtida localmente. No Brasil, por exemplo, 50000ha de floresta serão destruídos anualmente para produzir o carvão de madeira necessário como combustível ao projecto de mineração e fundição de ferro do Grande Carajás (Tabela 5.11).

**Tabela 5.11** – Exemplos de “áreas de desastre ambiental” (retirado de Mckinney e Schoch, 1998).

Localização	Operação	Impactos ambientais
Sudbury, Ontario, Canadá	Fundição de níquel	<ul style="list-style-type: none"> <li>– É uma das mais conhecidas “zonas mortas” do ponto de vista ambiental.</li> <li>– Pouca ou nenhuma vegetação sobrevive numa área de 10400 ha em redor da unidade de fundição.</li> <li>– Chuva ácida destrói a população de peixes em lagos existentes num raio de 65km.</li> </ul>
Estado do Pará, Brasil	Projecto de exploração e fundição de ferro do Grande Carajás	<ul style="list-style-type: none"> <li>– A necessidade de combustível obrigará ao corte anual de 50 000 ha de floresta tropical durante os 250 anos de vida do projecto.</li> </ul>
Bacia do Amazonas, Brasil	Exploração de ouro	<ul style="list-style-type: none"> <li>– A região foi invadida por centenas de milhar de mineiros, que entulham completamente os rios com sedimento e introduzem anualmente no sistema cerca de 110 ton de mercúrio.</li> </ul>
Ilo-Locumba, Perú	Exploração e fundição de cobre	<ul style="list-style-type: none"> <li>– A unidade de fundição emite anualmente 660000 ton de compostos de S para a atmosfera.</li> <li>– Cerca de 40 milhões de m<sup>3</sup> de resíduos contendo Pb, Zn, Cu, Al, são anualmente produzidos e acumulados em escombreliras.</li> <li>– Quantidades traço de cianeto são lançadas no oceano, envenenando a fauna marinha numa área de 20000 ha.</li> <li>– Cerca de 882000 ton de escórias não tratadas são lançadas anualmente no oceano.</li> </ul>
Mina de Panguana, Bougainvill, Papua, Nova Guiné	Exploração de cobre em sulfuretos	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Antes do encerramento da mina (1989), foram lançadas 661 milhões de ton de resíduos no rio Kawerong, que cobriram 1800 ha deste sistema fluvial, incluindo 700ha do delta terminal.</li> <li>– A vida aquática foi totalmente destruída e a revolta das populações foi a principal causa de uma guerra civil.</li> </ul>
Nauru, Pacífico Sul	Exploração de fosfatos	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Quando a exploração terminar (1998-2008) 80% dos 2100ha da ilha estarão completamente inabitáveis.</li> </ul>
Butte, Montana e bacia do Rio Clark Fork, E.U.A.	Exploração e processamento de ouro	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Zona contaminada com altas concentrações de Cu, Cd, As e Pb nas águas superficiais e subterrâneas.</li> <li>– Vasta área coberta com resíduos, escórias, etc., produzidos durante 125 anos de laboração.</li> <li>– Acredita-se que a contaminação seja responsável pelas elevadas taxas de mortalidade locais.</li> </ul>

Em muitos países, o século XX foi decisivo no que respeita à regulamentação das actividades com impacto negativo no ambiente. Citam-se como exemplos, o “Clean Air Act” estabelecido desde 1970 e o “Clean Water Act”, desde

1972, que restringem severamente as descargas de poluentes na água superficial e as emissões de gases para a atmosfera, permitidas à actividade mineira.

A exploração de recursos minerais é efectuada em minas a céu aberto ou subterrâneas, dependendo da dimensão do depósito, da sua geometria, profundidade e factor de enriquecimento. Por vezes são usadas combinações de métodos de exploração superficiais e em profundidade.

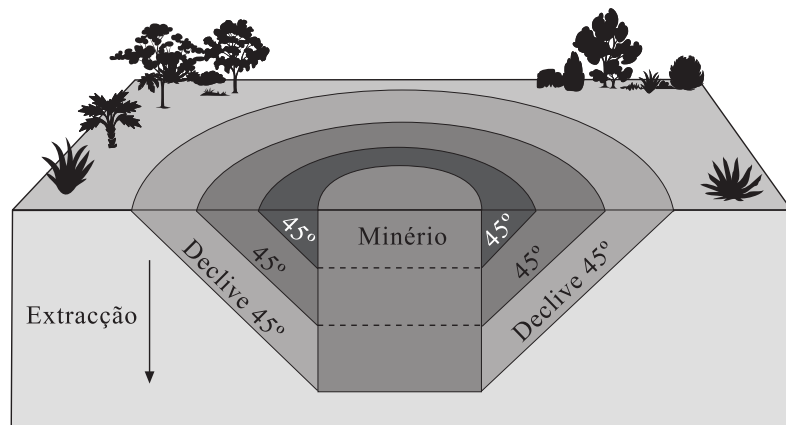
As minas a céu aberto incluem as maiores escavações do Mundo, de que é exemplo paradigmático a exploração de cobre de Bingham Canyon no Utah (E.U.A.) com 800m de profundidade e 4km de largura, e que constitui o maior desaterro antrópico da Terra.

As minas subterrâneas têm impacto visual menor que as explorações superficiais, perturbando uma área relativamente pequena da superfície. Até há alguns anos atrás, a laboração em minas subterrâneas era muito perigosa; mortes e acidentes ocorrem ainda hoje mas as minas são de longe menos perigosas devido à existência de legislação de segurança, ao melhoramento tecnológico e à necessidade de menos mão-de-obra em laboração simultânea.

### 5.9.1 *Produção de resíduos rochosos e escombrelras*

No que diz respeito às minas superficiais, os resíduos rochosos produzidos pela actividade de exploração incluem as rochas que estão acima do material a ser explorado e que têm que ser removidas e as escombrelras, ou seja as acumulações de material estéril (ganga<sup>8</sup>) que é deixado depois do mineral ter sido extraído. Em 1991, cerca de 990 milhões de toneladas de minério de cobre de baixo teor foram extraídos nos E.U.A. para produzir 9 milhões de toneladas de cobre, o que significa que 99% da rocha escavada é desperdício. Para a maioria dos minérios os resíduos situam-se tipicamente nos 80-90%. À medida que a escavação se aprofunda, a sua largura à superfície aumenta grandemente, elevando a proporção de resíduo (Fig. 5.11). Estima-se que no início deste século se produza três vezes mais resíduos do que em 1978 por cada tonelada de cobre produzido. À escala global, as operações mineiras tornaram-se assim numa força tão poderosa como os processos de erosão natural. Estima-se que mais de 25 mil milhões de ton de minerais (não energéticos) sejam removidos da Terra anualmente e, incluindo os materiais que estão por cima do minério e que tem que ser removidos, o total de material artificialmente removido pelo Homem nas minas em cada ano pode atingir cerca de 2 vezes a quantidade de sedimento transportada anualmente por todos os rios do Mundo.

<sup>8</sup> Os metais que se pretendem explorar estão misturados com outros materiais que não têm valor e que colectivamente são designados ganga. A ganga normalmente contém quartzo, feldspato, micas, calcite, dolomite. Por vezes as pilhas de ganga são exploradas como minérios de baixo teor mas os custos de extracção aumentam dramaticamente bem como o consumo de energia, poluição e produção de resíduos.



**Figura 5.11** – Efeito do aumento da profundidade de extração na quantidade de rocha que é necessário remover. O declive não pode ultrapassar 45° devido ao perigo de colapso.

Nas minas subterrâneas, os túneis seguem o corpo do minério tão próximo quanto possível, a fim de minimizar a quantidade de rocha a ser removida e, conseqüentemente, os custos. No entanto, a ganga é igualmente acumulada em escombrecas localizadas nas proximidades das minas.

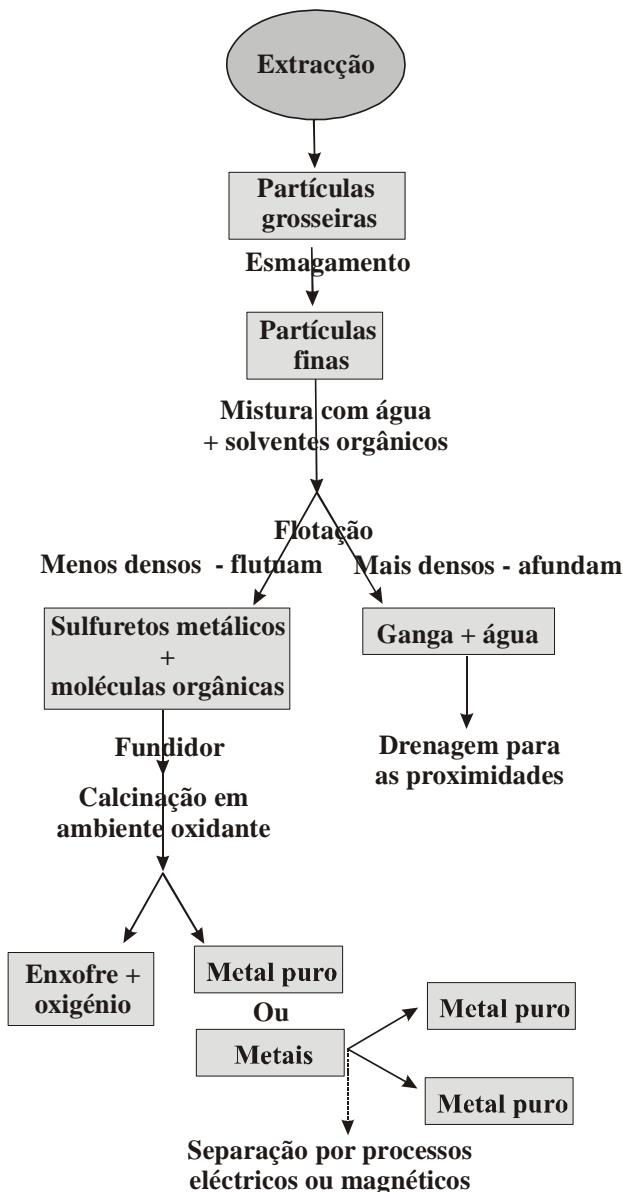
A lixiviação das escombrecas pode produzir ácidos e o lixiviado pode conter metais ou outras substâncias tóxicas, que vão afectar a água superficial e subterrânea, bem como os solos. A estabilidade das escombrecas é outro problema ambiental; como não são vegetadas, as pilhas são facilmente erodidas e por vezes dão origem a grandes deslizamentos. No caso particular das escombrecas das minas de urânio, pode dar-se origem ao espalhamento de pó radioactivo por acção do vento.

### 5.9.2 *Drenagem ácida da mina*

Frequentemente os elementos metálicos ocorrem combinados com oxigénio e enxofre. Também a pirite (sulfureto de ferro  $\text{FeS}_2$ ) é uma presença muito comum nos depósitos de minério. Conseqüentemente, muito enxofre está envolvido na actividade mineira. Durante a extração, a rocha é partida e esmagada, expondo superfícies frescas da rocha; após contacto com o ar e a água da chuva, o enxofre da pirite e calcopirite é convertido em ião sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), o ião chave no ácido sulfúrico  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . A libertação deste ácido para o ambiente causa a designada e já referida anteriormente drenagem ácida da mina, que pode causar acidificação da água dos rios. O pH das águas adjacentes às minas ricas em sulfuretos, chega a ser de 1-2 o qual é 100 000 a 1 000 000 de vezes mais baixo que o normal.

## 5.10 Degradação ambiental devida ao processamento de minério

De forma geral, o processamento do minério inclui o esmagamento em moinho para obtenção de pequenas partículas, o tratamento químico para separação entre o mineral desejado e a rocha hospedeira e remoção de impurezas e o aquecimento em fundidores a altas temperaturas para extracção do metal puro (Fig. 5.12). Alguns metais são ainda refundidos e refinados usando, por exemplo, processos electrolíticos.



**Figura 5.12** – Processamento do minério desde a extracção até à obtenção de metal puro.

---

Os processos de tratamento químico libertam frequentemente grandes quantidades de materiais tóxicos que podem ser ainda mais prejudiciais para o ambiente que a actividade de exploração e podem poluir quer os solos quer as águas, superficiais e subterrâneas. Usam-se rotineiramente centenas de toneladas de mercúrio, compostos de cianeto, querosene, agentes orgânicos flutuadores, carbono activo e ácido sulfúrico, entre outros. Por exemplo, o cobre residual é recuperado usando uma solução ácida e o ouro traço é retirado das escomboreiras usando uma solução de cianeto de sódio, um método chamado lixiviação por cianeto. O processo envolve empilhar o minério em grandes acumulações e pulvilhá-lo com uma solução de cianeto diluído, que percola através da pilha para dissolver o ouro; a solução contendo ouro é bombeada para uma central de processamento onde este é removido por electrólise; uma camada de argila e substâncias plásticas, impermeáveis, supostamente devem impedir que a solução de cianeto contamine o solo e a água subterrânea mas as fugas são comuns. Quando o ouro é recuperado, os operadores mineiros vão-se muitas vezes simplesmente embora e deixam grandes quantidades de efluentes tóxicos em lagos expostos. Em 1995, contudo, os cientistas descobriram uma bactéria que decompõe o cianeto em compostos inofensivos. Adicionando nutrientes, aumenta-se a população destas bactérias e simultaneamente a decomposição do cianeto. Esta técnica é já empregue com sucesso em várias minas e está a ser estendida a outras onde o cianeto é utilizado. O mercúrio líquido é muitas vezes utilizado para formar uma amálgama com o ouro, do qual é mais tarde separado mecânica ou quimicamente. A capacidade de combinação do ouro e mercúrio é conhecida desde há muito tempo e foi o método mais comum usado pelos mineiros desde o século passado. O uso do mercúrio causou e continua a causar poluição em muitos cursos de água, sendo aquele extremamente venenoso para a maioria dos organismos. Nos humanos, causa danos graves no sistema nervoso central. O tempo de residência do mercúrio na água dos rios e lagos é pequeno (dias a vários anos) mas tem uma afinidade para os sedimentos do leito do rio e pode aí permanecer retido por muitos anos. O mercúrio é tão usado nas actividades mineiras e industriais que o fluxo de mercúrio dos continentes para o oceano é hoje 4 vezes maior e para a atmosfera 275 vezes maior que na era pré-industrial (Tabela 5.12). Na medida em que o mercúrio é armazenado e não excretado pelas células, acumula-se a cada passo da cadeia alimentar, originando bioamplificação.

A água subterrânea pode igualmente ser poluída com metais pesados lixiviados da mina tais como As, Cd, Cu, Fe, Pb e Ni, entre outros.

Por seu lado, os fundidores produzem grande volume de partículas que expellem pela chaminé, sendo a actividade industrial que mais material particulado produz e que pode ser depositado localmente ou transportado por longas distâncias: fumo e partículas finas, óxido de azoto e óxido de enxofre (muito importante

na produção de chuva ácida), metais vaporizados entre os quais arsénio, Pb e Cd e compostos orgânicos voláteis. Estima-se que 8% das emissões de enxofre para a atmosfera mundial provenham de fundidores de Cu e outros metais não ferrosos. “Zonas mortas”, sem vegetação ou vida animal, cobrem milhares de hectares à volta de muitos fundidores. Em Inglaterra, 2000 anos de fundição de metal destruíram efectivamente a fertilidade de cerca de 400000 ha de área agrícola. A fundição produz também escória, um resíduo volumoso produzido após os metais valiosos terem sido removidos. A escória é vítrea porque arrefece rapidamente, assemelhando-se a material escuro vulcânico, e é enriquecida em metais pesados tóxicos que não foram retirados do minério tais como o cádmio, o chumbo ou o arsénio. Estes elementos tóxicos podem poluir o solo envolvente e a água subterrânea, sendo de grande preocupação ambiental os locais onde a escória é armazenada.

**Tabela 5.12** – Fontes das emissões atmosféricas de metais. A taxa natural é a que deriva de processos geológicos e a taxa antropogénica de actividades humanas.

Elemento	Taxa natural (ton/ano)	Taxa antropogénica (ton/ano)	Razão Antropogénica/natural
Alumínio	48 900 000	7 200 000	0,15
Ferro	27 800 000	10 700 000	0,38
Manganês	605 000	316 000	0,52
Cobalto	7 000	4 400	0,63
Crómio	58 000	94 000	1,6
Níquel	28 000	98 000	3,5
Cobre	19 000	263 000	13,8
Zinco	36 000	840 000	23,2
Arsénio	2 800	78 000	27,9
Prata	60	5 000	83,3
Mercúrio	40	11 000	275
Chumbo	5 900	2 030 000	344

## 5.11 Restauração

Finalizada a exploração, a mina é fechada. É conveniente proceder para nos assegurarmos que os materiais das escombrelas estão convenientemente acondicionados e propor um plano para a respectiva monitorização. Quando a mina é fechada permanentemente, a legislação prevê que o local seja limpo, a superfície topográfica e as condições ambientais repostas e, se apropriado,

---

usado para outros fins que incluem potencialmente actividades de lazer, agricultura, conservação da natureza ou aterros sanitários. O processo de limpeza e reabilitação de um sítio contaminado após uso industrial é designado por restauração.

A regulamentação ambiental específica para as minas é relativamente recente e as minas que foram abandonadas antes de 1970 podem não ter recebido a atenção que é agora requerida. Um dos principais problemas relacionados com as minas antigas é a drenagem ácida da mina. Outros problemas são a poluição das águas, fogos subterrâneos e colapsos/subsidência. Pode ser especialmente difícil lidar com impactos ambientais de minas abandonadas do ponto de vista legal e financeiro porque é muitas vezes impossível encontrar alguém com responsabilidade legal pelo local.

## 5.12 Ciclo dos metais

Devido à actividade mineira, os elementos que ocorrem em concentrações localizadas na litosfera são mobilizados ou libertados para outros sistemas terrestres. Na medida em que os metais têm uma forte tendência para formar ligações reversíveis com muitos outros elementos (incluindo o C) ocorrem no sistema terrestre numa variedade de formas. O cobre fornece um exemplo típico de como um metal circula ciclicamente através dos sistemas terrestres. Tal como outros metais na superfície terrestre, o cobre ocorre como minério concentrado (>100 a alguns milhares de ppm) ou disseminado nos sedimentos e rochas da litosfera. Deste reservatório, pode ser mobilizado, em grande parte por actividades humanas, meteorização e actividade vulcânica. A maior parte do cobre libertado para a atmosfera é o resultado de emissões industriais ou erosão eólica de material meteorizado. Muito pouco vem de emissões vulcânicas. Durante a meteorização, o oxigénio atmosférico e da hidrosfera liga-se com o cobre para formar compostos e iões que são transportados rapidamente em solução em água que drena das vertentes e nos rios. Algum cobre é armazenado em moléculas de C nos sistemas terrestres, maioritariamente nos solos e nos organismos vivos. As plantas consomem cobre dos solos para construir as células, depois devolvem-no quando morrem. Uma vez libertado das rochas e sedimentos por meteorização, a maior parte do cobre é transportado para o oceano na forma dissolvida ou como partículas sólidas em suspensão. No oceano, algum cobre permanece dissolvido mas muito é enterrado com os sedimentos do fundo marinho, voltando ao reservatório litosférico. Eventualmente, devido à actividade das placas tectónicas, algum deste cobre voltará à superfície terrestre por up-lift ou vulcanismo, onde uma vez mais se mobiliza e recomeça o ciclo. O tempo de residência do cobre nos diferentes sistemas terrestres é importante para avaliar o impacto ambiental das actividades

mineiras. O tempo de residência do cobre nos reservatórios do sistema terrestre pode ser calculado como:

- Tempo de residência = stock no reservatório/fluxo.

Num sistema em equilíbrio, o fluxo do cobre é a quantidade total que entra ou sai de um reservatório. Por exemplo, o tempo de residência do cobre na atmosfera é pequeno:

Tempo de residência do cobre na atmosfera =  $26 \times 10^8 \text{ g Cu} / 709 \times 10^8 \text{ g Cu/ano}^9 = 0,04 \text{ anos} = 13 \text{ dias}$ .

Em contraste, o cobre tem um tempo de residência muito maior nos solos:

- Tempo de residência do cobre nos solos =  $6,7 \times 10^{15} \text{ g Cu} / 6,2 \times 10^{12} \text{ g Cu/ano} = 1081 \text{ anos}$

Por outras palavras, o cobre circula rapidamente pela atmosfera (13 dias) mas devagar nos solos (1081 anos). Um exemplo da consequência ambiental desta diferença nos tempos de residência é que mesmo depois de reduzirmos as emissões de cobre para a atmosfera por actividade mineira, levarão muitos anos para o excesso de cobre ser removido dos solos que circundam a área de processamento.

<sup>9</sup> Valor que resulta de: 3.6 (emissões vulcânicas) + 120 (poeiras sopradas pelo vento) + 25 (associado a partículas orgânicas) + 560 (emissões atmosféricas devidas a acções humanas) =  $708.6 \times 10^8 \text{ g Cu/ano}$ .

### 5.13 Exploração de recursos minerais não metálicos

Tal como os metais, cada um dos recursos minerais não metálicos (rocha ornamental, areia e cascalho, depósitos de argila, rocha fosfatada e enxofre, minerais plácer, laterites) tem problemas ambientais específicos.

A exploração de areia e balastros tem de estar muito próxima do local onde estes materiais vão ser usados ou perdem a sua competitividade económica. Os custos de transporte para os largos volumes precisos na construção civil são muito altos para estes materiais que são baratos. A areia e balastros comerciais são usados para a base das autoestradas ou pavimento de asfalto, para misturar com cimento (formado a partir do aquecimento de calcário e argila) para fazer betão. Os depósitos de areia e cascalheira ideais consistem inteiramente de quartzo porque é mais duro, forte e quimicamente inerte. Particularmente indesejável é a opala e rochas vulcânicas ricas em sílica, porque estes materiais reagem quimicamente com o sódio e o potássio presente em certos tipos de cimento.

Também na pedra de construção, a proximidade do local de utilização é uma exigência. Efectivamente, embora o processo de retirar a pedra em pedreiras

seja relativamente barato, os blocos de pedra são muito pesados e o seu transporte é dispendioso. Por esta razão, as pedreiras raramente se localizam a mais de 50km de uma cidade e geralmente estão tão próximas quanto as leis ambientais o permitem. Devido ao elevado preço do transporte, as pedreiras tendem a ser numerosas e pequenas, operando perto da actividade de construção. As comunidades residenciais muitas vezes vêm a pedreira como prejudicial e tentam limitar as suas actividades. Na verdade, as pedreiras associam-se a explosivos (dinamite), tráfego pesado de camiões, pó de rocha e danos na paisagem (impacto visual). A Tabela 5.13 lista os factores ambientais mais afectados pela exploração de pedreiras, areeiros e barreiros, bem como os impactes e as medidas mitigadoras que se podem implementar para minimizar aqueles.

**Tabela 5.13** – Impactes ambientais e factores ambientais afectados pela exploração de pedreiras, areeiros ou barreiros e medidas mitigadoras passíveis de aplicar.

Factores ambientais	Impacte	Medidas mitigadoras
Solo	Contaminação com poluentes resultantes da actividade de exploração	Não lançar efluentes no solo; acumulação dos resíduos sólidos em zonas adequadas
Qualidade do ar	Influência dos gases e poeiras sobre a fauna, flora e população da área envolvente	Medidas de redução da emissão de poeiras, no desmonte, transporte e tratamento; localizar as principais fontes emissoras de poeiras ao abrigo dos ventos dominantes
Ruído	Pressão do nível de ruído na exploração e povoações próximas	Utilização de equipamentos menos ruidosos; diminuição da carga de explosivos
Hidrogeologia	Interferência com o nível freático, risco de inundação e erosão a jusante, infiltração de águas contaminadas com elevados teores de sólidos em suspensão	Bacias de decantação; extrair pouca quantidade de água de modo a não interferir com os aquíferos; evitar a contaminação da água com resíduos; localização cuidada de aterros; reaproveitamento da água para o funcionamento da exploração ou para a rede pública
Fauna e flora	Destruição de habitats, abandono do local	Reconstituição da superfície topográfica no final da exploração; se possível, repovoamento das espécies animais e vegetais
Paisagem	Alteração do modelado do terreno, contraste visual com a paisagem circundante	Construções integradas na paisagem; implementação de um plano de recuperação no final da exploração
Património natural, cultural e infra-estruturas	Destruição de locais de inegável interesse; influência na rede viária	Alteração do local de exploração para preservação da área de interesse; dimensionamento da rede viária para o tráfego previsto

A exploração de placers de rio não só instabiliza os cursos fluviais do ponto de vista da dinâmica sedimentar como coloca muitos sólidos em suspensão, perturbando a vida aquática. No que respeita aos placers de praia, o maior efeito é o aumento da erosão costeira por rompimento do equilíbrio natural da adição/remoção de sedimentos.

---

O processamento das bauxites para obtenção do alumínio, inclui um tratamento com soda cáustica concentrada (NaOH) que dissolve a sílica presente e o óxido de alumínio. A solução é depois tratada com CO<sub>2</sub> que faz com que o óxido de alumínio precipite. O alumínio puro é separado do óxido de alumínio por electrólise: o óxido de Al dissocia-se na água para formar iões de Al (Al<sup>3+</sup>) e iões hidróxido (OH<sup>-</sup>); quando estes iões são expostos a uma corrente eléctrica, os iões de Al carregados positivamente são atraídos para o terminal negativo onde precipitam como alumínio puro.

## Actividades

1. O que é um recurso mineral?
2. Qual a diferença entre reservas e recursos? Descreva os factores que levam à expansão ou contracção das reservas.
3. Como se formam os diamantes?
4. Que tipo de minerais se espera encontrar em depósitos placer? Porquê?
5. Porque é que os recursos minerais se dizem não renováveis?
6. Liste alguns dos tipos de recursos minerais mais importantes. Quais são mais importantes em termos de quantidade usada? E em termos de valor económico?
7. Descreva brevemente alguns dos processos de formação dos recursos minerais.
8. O que é um minério?
9. Distingue entre depósitos minerais, minério e reservas.
10. Explique como a economia e o factor de concentração se relacionam com a definição de minério.
11. Qual a diferença entre uma reserva estática e uma reserva exponencial?
12. Discuta as vantagens e desvantagens de seguir estratégias para lidar com a escassez de minerais: reciclagem, substituição, conservação e durabilidade.
13. Os minérios formados por processos hidrotermais tendem a estar associados a fronteiras de placas. Porquê?

- 
14. Descreva os processos de extracção e processamento de um metal típico como o cobre.
  15. O que é a desmaterialização?
  16. Se um certo corpo estanhífero contiver 0,7% de estanho (em peso) quanto minério teria que ser extraído e processado (assumindo recuperação completa de estanho) para produzir 1 ton de estanho?
  17. Se um certo corpo cuprífero contiver 0,4% de cobre (em peso) quanto minério teria que ser extraído e processado (assumindo recuperação completa do cobre) para produzir 1 ton de cobre?
  18. Que tipos de degradação ambiental estão associados com o uso de minerais?
  19. É plausível a formação actualmente de grandes depósitos de ferro de forma semelhante à formação dos BIF? Porquê?
  20. O que é um evaporito? Dê um exemplo de um mineral evaporítico comum.
  21. À medida que as reservas de um mineral se esgotam, alguns recursos podem ser reclassificados como reservas. Explique como e porquê.
  22. Porque é que o Al e o Pb são comparativamente ao aço fáceis de reciclar?
  23. Descreva o risco associado a minas subterrâneas.

## **Bibliografia**

ARMS, K.

1990 *Environmental science*. Saunders College Publishing, 468 p.

BELL, F. G.

1998 *Environmental Geology. Principles and Practice*. Blackwell Science, 594 p.

BENNETT, M. R. e DOYLE, P.

1997 *Environmental Geology. Geology and the human environment*. John Wiley & Sons, 501 p.

BLATT, Harvey

1997 *Our Geologic Environment*. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 541 p.

---

CHIRAS, D.

2001 *Environmental Science. Creating a sustainable future*. Library of Congress Cataloging-in-Publication Data, 730 p.

COATES, D. R.

1981 *Environmental Geology*. John Wiley & Sons, 701 p.

CUNNINGHAM, W. P. e SAIGO, B. W.

1995 *Environmental Science. A global concern*. 3.<sup>a</sup> edição. WCB Publishers, 612 p.

McKINNEY, M. L. e SCHOCH, R. M.

1998 *Environmental Science. Systems and Solutions*. Jones and Bartlett Publishers, 639 p.

MERRITTS, D.; WET, A. e MENKING, K.

1997 *Environmental Geology. An Earth System Science Approach*. W. H. Freeman and Company, New York, 452 p.

MORAN, J. M.; MORGAN, M. D. e WIERSMA, J. H.

1986 *Introduction to Environmental Science*. W. H. Freeman and Company, 2.<sup>a</sup> edição, 709 p.

MURCK, B. W.; SKINNER, B. J. e PORTER, S. C.

1996 *Environmental Geology*. John Wiley & Sons, Inc., 535 p.

THOMPSON, G. R. e TURK, J.

1993 *Earth Science and the Environment*. Saunders College Publishing, 622 p.

TURK, J. e THOMPSON, G. R.

1995 *Environmental Geoscience*. Saunders College Publishing, 428 p.

MONTGOMERY, C. W.

1995 *Environmental Geology*. 4.<sup>a</sup> edição, WCB Publishers, 496 p.

Composto e paginado  
na **UNIVERSIDADE ABERTA**

1.<sup>a</sup> edição

Lisboa, 2005

