

An aerial photograph showing a dense network of light-colored, winding rivers and streams flowing through a dark, forested landscape. The rivers form a complex, branching pattern across the terrain.

20

RECURSOS HÍDRICOS

Ricardo Hirata

Em áreas de elevado risco geológico e climatológico, como aquelas sujeitas a terremotos e vulcanismo, a água subterrânea é uma reserva estratégica, uma vez que é menos vulnerável aos eventos catastróficos que atingem as populações.

Outro importante papel desempenhado pela água subterrânea é sua descarga em cursos de água superficial (**fluxo de base**), como rios e lagos, o que permite a sua manutenção durante a época de

seca. O fluxo de base pode chegar à totalidade da vazão de um rio durante certas épocas do ano, permitindo a utilização desse recurso superficial para os mais diversos fins, incluindo a captação para o abastecimento ou para a diluição do esgoto não tratado lançado pelas cidades. O mesmo mecanismo garante a manutenção de áreas alagadiças, como brejos, pântanos, mangues e restingas, importantes para o equilíbrio ecológico.

Tabela 20.5 Padrão de potabilidade e classificação dos corpos de água considerando alguns compostos inorgânicos e orgânicos de risco à saúde.

COMPOSTOS		Padrão de			
INORGÂNICOS (mg/L)	Potabilidade*	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4
Amônio (NH ₄)	0,01	0,02	0,02	-	-
Arsênio (As)	0,5	0,05	0,05	0,05	-
Cádmio (Cd)	0,005	0,001	0,001	0,01	-
Cromo hexavalente (Cr)	0,05	0,05	0,05	0,05	-
Cianeto (CN)	0,05	0,01	0,01	0,2	-
Fluoreto (F)	0,6-1,7	1,4	1,4	1,4	-
Ferro (Fe)	0,3	-	-	-	-
Chumbo (Pb)	0,05	0,03	0,03	0,05	-
Mercúrio (Hg)	0,001	0,0002	0,0002	0,002	-
Nitrato (NO ₃ -N)	10	10	10	10	-
COMPOSTOS		Padrão de			
ORGÂNICOS (µg/L)**	Potabilidade*	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4
Benzeno	10	10	10	10	-
Clorobenzeno	0,1	-	-	-	-
Tetracloroeto de carbono	3	3	3	3	-
Clorofórmio	30	-	-	-	-
Pentaclorofenol	10	10	10	10	-
Clordano (total de isômeros)	0,3	0,04	0,04	0,3	-
DDT (diclorodifenil- tricloroetano)	1	0,002	0,002	1	-
PCBs	-	0,001	0,001	0,001	-
2,4 D (ácido dicloro-fenoxiacético)	100	4	4	20	-

* Portaria 36 do Ministério da Saúde; **A Comunidade Econômica Européia (1982) recomenda 10µg/L de hidrocarbonetos dissolvidos totais e de 0,5µg/L de fenóis sintéticos.

O grande “planeta água” está passando sede. É incrível imaginar que atualmente dezenas de milhões de pessoas vivam com menos de cinco litros de água por dia em um planeta que possui 70% de sua superfície coberta por água. É certo que a “hidrosfera aproveitável” é suficiente para o abastecimento de água de toda a população da Terra, mas ela é irregularmente distribuída. A água como substância está presente em toda parte, mas o recurso hídrico, entendido como um bem econômico e que pode ser aproveitado pelo ser humano dentro de custos financeiros razoáveis, é mais escasso.

Cerca de 97,5% de toda a água na Terra são salgadas. Menos de 2,5% são doces e estão distribuídas entre as calotas polares (68,9%), os aquíferos (29,9%), rios e lagos (0,3%) e outros reservatórios (0,9%). Desta forma, apenas 1% da água doce é um recurso aproveitável pela humanidade, o que representa 0,007% de toda a água do planeta.

O problema da escassez de água está atingindo proporções alarmantes. Em 1972, a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente em Estocolmo já denunciava uma crise mundial da água. Na década de 1990, o Comitê de Recursos Naturais das Nações Unidas confirmou que 80 países, que repre-

sentavam 40% da população mundial, padeciam de grave carência de água e que em muitos casos esta falta era um fator limitante para o desenvolvimento econômico e social. A escassez de água atinge hoje mais de 460 milhões de pessoas. Se não for alterado o estilo de vida da sociedade, um quarto da população mundial sofrerá este problema nas próximas décadas.

A contaminação da água vem crescendo assustadoramente, sobretudo nas zonas costeiras e em grandes cidades em todo o mundo. Fornecer água potável para todos é o grande desafio da humanidade para os próximos anos. A água de boa qualidade pode reduzir a taxa de mortalidade e aumentar a expectativa de vida da população. Segundo a Organização Mundial da Saúde, cerca de 4,6 milhões de crianças de até 5 anos de idade morrem por ano de diarreia, doença relacionada à ingestão de água não potável, agravada pela fome e resultado da má distribuição econômica de renda. A falta de higiene associada à escassez de água é causadora de doenças como tracoma, infecção contagiosa que atinge a córnea e causa a cegueira. Estima-se que meio bilhão de pessoas em países pobres sofrem deste mal. O abastecimento de água potável e o saneamento ambiental poderiam reduzir em 75% as taxas de mortalidade e enfermidades da população.

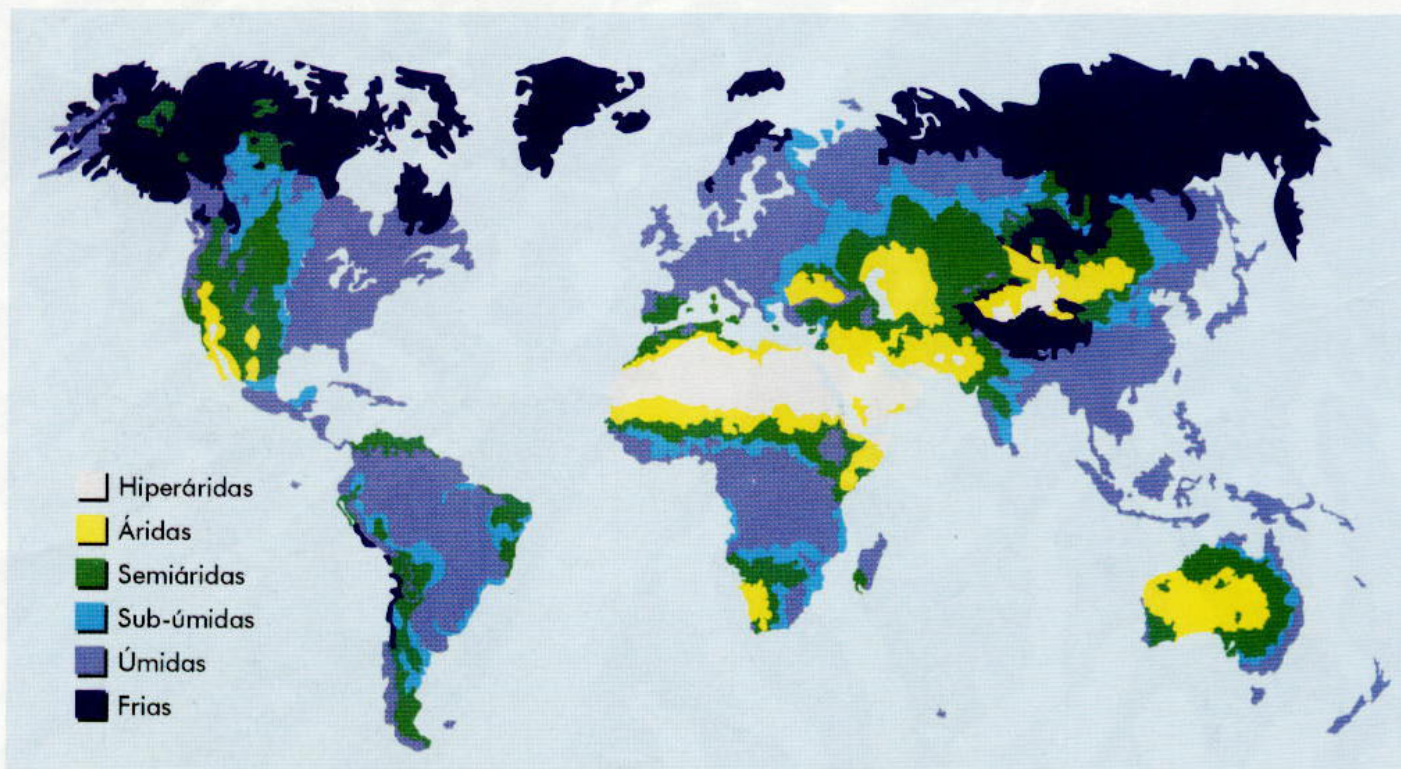


Fig. 20.1 Distribuição das regiões secas e úmidas no planeta. Fonte: Nações Unidas, 1997.

◀ Vista aérea da região de mangues no Parque Nacional do Cabo Orange (AP). Em muitas situações, a água subterrânea é origem e parte dos corpos de água superficial. Por que distingui-los, se são componentes do mesmo recurso? Foto: Zig Koch/Kino Arquivo

Neste capítulo veremos a situação dos recursos hídricos no Brasil e no mundo, sua disponibilidade, seu uso atual e as perspectivas futuras. Especial atenção será dada à água subterrânea, à sua distribuição e aos impactos causados pela atividade humana, incluindo a contaminação e a extração excessiva.

20.1 Abundância e Distribuição da Água Doce no Planeta

Aproximadamente 72.000 km³/ano de água retornam à atmosfera por evapotranspiração, dos 119.000 km³/ano da precipitação que caem sobre os continentes (Cap. 7). Os 47.000 km³/ano restantes de água doce que circulam pelo planeta, através do esco-

amento superficial e subterrâneo representam o **excedente hídrico**, que é a diferença entre o volume precipitado e o evapotranspirado, e pode ser decomposto no escoamento de água superficial e subterrânea.

A abundância de água em uma região é o resultado da interação entre o clima e a fisiografia. O Atlas da desertificação do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente mostra seis diferentes divisões segundo a disponibilidade de umidade, desde hiperáridas até úmidas (Fig. 20.1). As regiões como América do Sul e Ásia são aquelas onde há maiores porções de terras úmidas, enquanto os maiores desertos encontram-se no norte da África e centro da Ásia. Somente na bacia do Amazonas fluem 16% da água doce do planeta e apenas a bacia do Congo-Zaire representa

Tabela 20.1 Descarga dos rios dos países mais ricos e mais pobres em água do planeta.

País	Descarga média dos rios (km ³ /s)	País	Descarga média dos rios (km ³ /s)
Brasil	6.220	Malta	15
Rússia	4.059	Gaza	46
EUA (incluindo Alasca)	3.760	União dos Emirados Árabes	500
Canadá	3.290	Líbia	600
China	2.800	Singapura	600
Indonésia	2.530	Jordânia	680
Índia	1.850	Israel	750
Colômbia	1.200	Chipre	900
Peru	1.100		
Comunidade Econômica Européia (15 países)	1.171		

Tabela 20.2 Excedente hídrico nos continentes.

Região	Precipitação (km ³ /ano)	Evapotranspiração (km ³ /ano)	Excedente Hídrico (km ³ /ano)
Europa	8.290	5.320	2.970
Ásia	32.200	18.100	14.100
África	22.300	17.700	4.600
América do Norte	18.300	10.100	8.180
América do Sul	28.400	16.200	12.200
Austrália e Oceania	7.080	4.570	2.510
Antártica	2.310	0	2.310
Total	119.000	72.000	47.000

um terço das drenagens de todos os rios africanos (Tabela 20.1). As regiões semi-áridas constituem 40% da superfície continental e somam apenas 2% do escoamento hídrico superficial. Nos 9 países mais ricos em água, incluindo Brasil, Rússia, E.U.A., Canadá, China, Indonésia, Índia, Colômbia e Peru, estão concentrados 60% do total de água doce do mundo, ou seja, um volume superior a 26.800 km³/ano.

A Tabela 20.2 detalha o balanço hídrico dos principais continentes, indicando aqueles onde o excedente hídrico é positivo.

A má distribuição dos recursos hídricos não existe apenas espacialmente. Muitas vezes várias regiões são acometidas por grandes enchentes e em outra época do ano há períodos de seca. O tempo de residência da água na superfície terrestre também acaba por limitar sua disponibilidade. Suécia e Botswana recebem a mesma precipitação anual, mas o primeiro possui um clima úmido e o outro semi-árido. A razão desta desigualdade está nas altas taxas de evapotranspiração e distribuição irregular da chuva no país africano.

20.2 Demanda de Água

Segundo estatísticas recentes, estima-se que 9.000 km³/ano de água são acessíveis ao consumo humano e cerca de 3.500 km³ encontram-se armazenados em represas, somando um total de fácil acesso de 12.500 km³/ano. O escoamento superficial total é de 47.000 km³/ano, mas a exploração dos restantes 34.500 km³/ano é difícil, custosa ou pode causar impactos negativos ao meio ambiente. Atualmente, 6.500 km³ de água são utilizados por ano pela sociedade para diversos fins, concentrando-se no uso predominantemente agrícola, seguido pelo industrial e urbano (Fig. 20.2).

No século XX a demanda de água aumentou em mais de seis vezes, superando em duas vezes o crescimento populacional no período. O consumo *per capita* do recurso aumenta geometricamente com a melhora da renda da sociedade. Enquanto um volume de 80 litros/dia é considerado suficiente para a manutenção de uma pessoa em bons níveis de saúde e higiene, a população de Madagascar sobrevive com volume *per capita* de 5,4 litros/dia, e um cidadão norte-americano usa quantidades superiores a 500 litros/dia, sobretudo devido ao desperdício.

O próprio crescimento populacional demanda um aumento na produção agrícola. Hoje, 2.600 km³/ano de água são utilizados nas lavouras em todo o mundo.

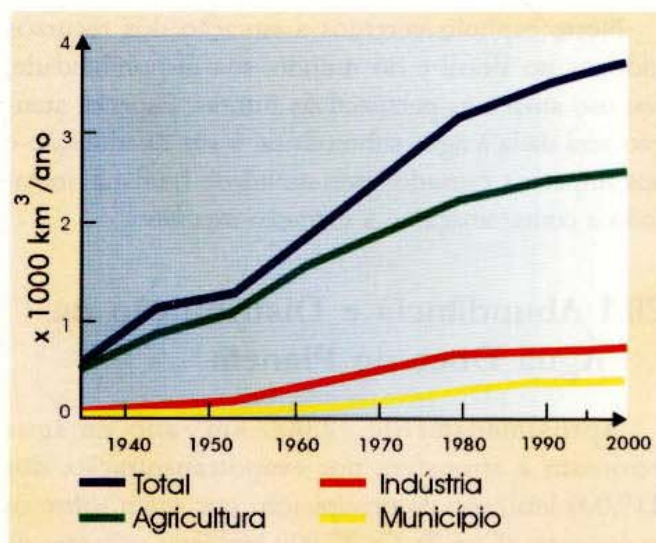


Fig. 20.2 Uso mundial de água por setores nos últimos 60 anos. Fonte: Nações Unidas, 1997.

O uso da irrigação, juntamente com a introdução de espécies de alto rendimento, a utilização de fertilizantes e agrotóxicos, tem permitido um grande rendimento das culturas. Embora ocupando somente 17% das terras agrícolas do mundo, a lavoura irrigada produz 35% da produção mundial de alimentos. A necessidade cada vez maior de água para a irrigação fez com que desde 1960 tenha havido um aumento de consumo de água em mais de 60%.

Dividindo-se globalmente a água existente no planeta por toda a sua população, não haveria escassez de água. Para o ano 2000, os aportes superficiais e subterrâneos de água poderiam fornecer cerca de 6.500 m³/ano.pessoa, ou seja 6,5 vezes maior que a quantidade mínima considerada razoável pelas Nações Unidas. Entretanto esses números são irrealistas, pois, além de considerarem toda a água de superfície e não aquela efetivamente disponível, não analisa a distribuição do recurso hídrico e da população no mundo. Considerando o número de pessoas em 1995, o uso *per capita* de água e a classificação em cinco níveis das Nações Unidas, determinou-se o grau de carência de água dos países (Fig. 20.3 e Tabela 20.3).

Nesse cenário o Brasil é um país privilegiado, uma vez que recentes estimativas indicam que aqui correm 53% da água doce da América do Sul e 12% da vazão total mundial dos rios, ou seja, um total de 177.900 m³/s. Esta imensa quantidade de água é resultado da extensão territorial, somada ao regime climático, predominantemente equatorial e tropical úmido, com precipitações médias anuais de 1.000 a 3.000 mm/ano em mais de 90% do território.

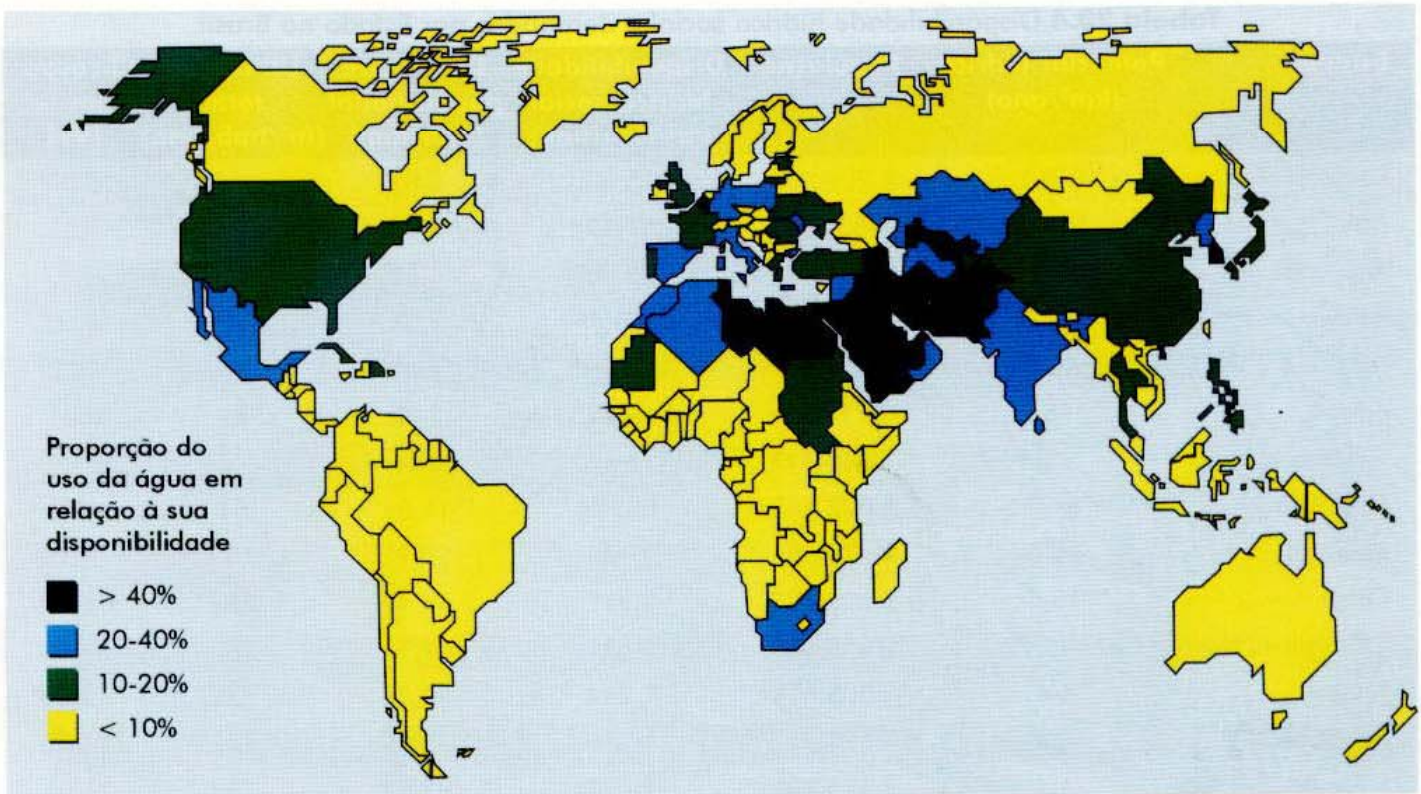


Fig. 20.3 Proporção entre uso e disponibilidade hídrica no mundo. Fonte: Nações Unidas, 1997.

Tabela 20.3 Classificação de Margat (1997) dos países segundo a disponibilidade e uso per capita de água em m³/ano.pessoa.

Disponibilidade						
Uso	Muito Pobre (<500)	Pobre (500-1.000)	Regular (1.000-2.000)	Suficiente (2.000-10.000)	Rico (10.000-100.000)	Muito Rico (>100.000)
Muito Baixo (<100)	Bahamas, Singapura	Quênia	Etiópia	Gana, Nigéria,	Angola, Indonésia, Zaire	Gabão
Baixo (100-500)	Argélia	Cabo Verde	África do Sul, Líbano, Polónia, Somália	China, Etiópia	Áustria, Bangladesh, Bolívia, BRASIL, Colômbia, Venezuela	Guiana (Fr)
Moderado (500-1.000)	E. Árabes, Gaza, Israel, Jordânia, Tunísia	Bélgica, Ucrânia		Alemanha, Espanha, França, Itália, México, Peru, Síria, Reino Unido	Albânia, N. Zelândia, Rússia	Islândia
Alto (1.000-2.000)	Arábia, Saudita, Líbia	Egito	Paquistão	EUA, Filipinas, Irã	Argentina, Austrália, Canadá, Chile	
Muito Alto (>2.000)	EUA (Baixo Colorado)			Iraque,	Turquistão, EUA (Colorado)	Sibéria (Rússia)

Tabela 20.4 Disponibilidade hídrica social e demandas por Estado no Brasil.

Estados	Potencial hídrico (km ³ /ano)	População	Disponibilidade hídrica social (m ³ /hab/ano)	Densidade populacional (hab/km ²)	Utilização total (m ³ /hab/ano)	utilização em % 1991
Rondônia	150,2	1.229.306	115.538	5,81	44	0,03
Acre	154,0	483.593	351.123	3,02	95	0,02
Amazonas	1.848,3	2.389.279	773.000	1,50	80	0,00
Roraima	372,3	247.131	1.506.488	1,21	92	0,00
Pará	1.124,7	5.510.849	204.491	4,43	46	0,02
Amapá	196,0	379.459	516.525	2,33	69	0,01
Tocantins	122,8	1.048.642	116.952	3,66		
Maranhão	84,7	5.022.183	16.226	15,89	61	0,35
Piauí	24,8	2.673.085	9.185	10,92	101	1,05
Ceará	15,5	6.809.290	2.279	46,42	259	10,63
R.Grande do Norte	4,3	2.558.660	1.654	49,15	207	11,62
Paraíba	4,6	3.305.616	1.294	59,58	172	12,00
Pernambuco	9,4	7.399.071	1.270	75,98	268	20,30
Alagoas	4,4	2.633.251	1.692	97,53	159	9,10
Sergipe	2,6	1.624.020	1.625	73,97	161	5,70
Bahia	35,9	12.541.675	2.872	22,60	173	5,71
Minas Gerais	193,9	16.672.613	11.611	28,34	262	2,12
Espírito Santo	18,8	2.802.707	6.714	61,25	223	3,10
Rio de Janeiro	29,6	13.406.308	2.189	305,35	224	9,68
São Paulo	91,9	34.119.110	2.209	137,38	373	12,00
Paraná	113,4	9.003.804	12.600	43,92	189	1,41
Sta. Catarina	62,0	4.875.244	12.653	51,38	366	2,68
R.Grande do Sul	190,0	9.634.688	19.792	34,31	1.015	4,90
Mato Grosso do Sul	69,7	1.927.834	36.684	5,42	174	0,44
Mato Grosso	522,3	2.235.832	237.409	2,62	89	0,03
Goiás	283,9	4.514.967	63.089	12,81	177	0,25
D. Federal	2,8	1.821.946	1.555	303,85	150	8,56
BRASIL	5.610,0	157.070.163	35.732	18,37	273	0,71

Fonte: Rebouças, 1994.

A maior bacia hidrográfica brasileira é a do Amazonas, com 72% da vazão dos rios nacionais, seguida das bacias do Paraná (6,3%), Tocantins (6%), Paraíba-Atlântico Norte (3%), Uruguai (2,5%), e Atlântico Sul e São Francisco (ambas com 1,7%).

O valor de disponibilidade hídrica social, ou seja, o total de água da descarga continental, dividido pela população no Brasil é de 35.732 m³/hab/ano (Tabela 20.4). É possível notar que somente alguns Estados do Nordeste apresentam uma disponibilidade hídrica considerada regular (1.000-2.000m³/hab/ano), pois os

outros apresentam abundância do recurso. Entretanto uma análise mais detalhada vai expor a carência do recurso em bacias hidrográficas específicas, como a do Alto do Tietê (SP), do Oriental Pernambuco, do Leste Potiguar (RN) e de Fortaleza (CE), por exemplo. Os Estados brasileiros de maior utilização *per capita* de água são Rio Grande do Sul, São Paulo, Santa Catarina, Pernambuco e Minas Gerais, e aqueles que, porcentualmente, mais utilizam o recurso hídrico total são Pernambuco, São Paulo, Paraíba, Rio Grande do Norte e Ceará.

20.3 Impacto das Atividades Antrópicas nos Recursos Hídricos

As extrações desmedidas dos corpos de água e a contaminação são os dois grandes problemas que têm ocupado as atenções dos governos nas últimas décadas. O abastecimento de grandes áreas metropolitanas exige que a água seja trazida de regiões cada vez mais distantes, onerando e comprometendo os recursos hídricos. Ao mesmo tempo, tradicionalmente os rios têm servido de receptores para os lançamentos de esgotos urbanos, de lixos e de efluentes agro-industriais. Em várias regiões o meio ambiente tem sido incapaz em degradar estes contaminantes e restituir o seu equilíbrio natural.

A derivação de um curso de água pode também comprometer a sua qualidade, uma vez que a redução na vazão do rio diminui a sua capacidade depurativa, aumentando assim a contaminação.

No Brasil os corpos de água doce são classificados em cinco classes, segundo a sua qualidade bio-físico-química. As classes limitam a concentração de contaminantes presentes nos efluentes lançados em rios ou infiltrados em aquíferos. Por exemplo, o chumbo pode ser tolerado em até 0,03mg/L em corpos de classe 1 e 2 e até 0,05 na classe 3 e praticamente sem restrição para a classe 4. A classe especial, que inclui as águas subterrâneas, é aquela em que os lançamentos de efluentes ou infiltrações de contaminantes não devem exceder as qualidades naturais do corpo receptor ou os padrões de potabilidade humana para a água (Tabela 20.5).

O padrão de potabilidade é definido pelas legislações federal e estadual, com uma série de parâmetros físicos, químicos e biológicos e os limites máximos permitidos para o ser humano. Esse padrão é baseado em dois critérios diferentes: um que afeta a saúde (toxicidade, carcinogenicidade e mutagenicidade) e o segundo, associado a valores estéticos (organolépticas). Várias são as limitações de tais listas, uma vez que a quantidade de produtos químicos comercializados hoje supera em muito as substâncias analisadas quanto ao risco à saúde e ao meio ambiente.

O que representa 1µg/L (micrograma por litro) de contaminação?

Alguns compostos químicos como solventes halogenados, utilizados amplamente como desengraxantes pela indústria moderna, são altamente tóxicos. O padrão de potabilidade para alguns deles não ultrapassa alguns microgramas por litro. Como um litro de água tem uma massa aproximada de 1 kg (densidade 1 kg/litro), pode-se dizer que 1µg/L corresponde a uma solução contendo um milionésimo de grama (0,000001g) de contaminante misturada em uma massa de 1 kg de água. É equivalente, então, a uma concentração de uma parte por bilhão (ppb), ou seja, 1 kg de contaminante em um bilhão de kg de água. Mas para se ter uma idéia de quão pequeno é esse valor, imagine um edifício residencial médio de 20 andares com 80 apartamentos. Se fosse possível enchê-lo completamente de água, seria necessário apenas o volume de uma xícara de chá do contaminante para se obter a concentração de 1ppb.

20.4 O Recurso Hídrico Subterrâneo

20.4.1 Ocorrência e importância da água subterrânea

Embora representem 97% da água doce líquida do planeta, o que por si só mostraria seu valor, as águas subterrâneas desempenham um papel fundamental no abastecimento público e privado em todo o mundo. Estima-se que mais de 1,5 bilhão de pessoas em núcleos urbanos e uma grande parcela da população rural tenham suas necessidades supridas pelo manancial subterrâneo. As tendências mundiais mostram um forte crescimento dessas cifras, sobretudo em países de economias periféricas, que estão encontrando na água subterrânea uma alternativa de baixo custo, devido a sua fácil obtenção e boa qualidade natural.

O valor econômico deste recurso também é grande. O uso agrícola na irrigação de pequenas e grandes propriedades tem aumentado, permitindo a regularização no suprimento de água em épocas de seca. Muitas vezes, em grandes centros urbanos, as águas subterrâneas podem até ter disponibilidades volumétricas menores, em comparação aos recursos superficiais, mas o uso pela indústria e comércio tem freqüentemente gerado produtos de maior valor agregado.

Na América Latina, embora não existam cifras oficiais seguras do uso da água subterrânea para o abastecimento público e privado, seu papel é vital para

muitos países. A Fig. 20.4 mostra a dependência dos países do recurso hídrico subterrâneo, indicando também alguns núcleos urbanos de grande demanda.



Fig. 20.4 Importância das águas subterrâneas para o abastecimento público na América Latina e Caribe.

Em pelo menos duas das maiores concentrações urbanas do continente americano, Cidade do México e Lima (Peru), os recursos hídricos subterrâneos suprem a maior proporção das necessidades municipais e domésticas de água potável. No caso da Cidade do México, a gigantesca cifra de 3.200 milhões de litros por dia (ML/dia) (94% do total suprido em 1982) é fornecida por um conjunto de 1.330 poços tubulares. A água distribuída na Grande Lima, incluindo o Porto de Callao, é obtida pelo bombeamento de 320 poços, produzindo mais de 650 ML/dia. Em outras grandes áreas urbanas, incluindo Buenos Aires e Santiago (Chile), a água subterrânea proporciona uma significativa parcela do suprimento municipal de água potável.

A excelente qualidade natural aliada ao baixo custo tem justificado o crescente uso deste recurso mesmo em áreas úmidas com excedentes hídricos, como na América Central ou no Brasil, onde 35% da população fazem uso deste recurso para o suprimento de suas necessidades de água potável. No Estado de São Paulo, por exemplo, 70% dos núcleos urbanos são abastecidos total ou parcialmente por águas oriundas de aquíferos, totalizando 34% da população.

20.5 A Influência das Atividades Antrópicas nos Recursos Hídricos Subterrâneos

20.5.1 A extração intensiva das águas subterrâneas

Muito embora os aquíferos formem o maior reservatório de água potável líquida do mundo, sua distribuição não é igual no planeta. Algumas áreas possuem uma abundância deste recurso enquanto em outras é quase inexistente. O principal controle é a interação entre as características geológicas e climatológicas da área. Como visto no Cap. 7, a permeabilidade e a porosidade da rocha definem a capacidade do aquífero em transmitir, armazenar e fornecer água. O clima, na zona de recarga, vai controlar os volumes ingressados de água ao aquífero, através do balanço hídrico.

Qualquer bombeamento de um poço causa alguma descida nos níveis de um aquífero. Caso a extração seja limitada, o nível de água se equilibrará em função do balanço entre a extração e a recarga. Entretanto, se a extração for maior que a capacidade de reposição de água no aquífero, o nível hidráulico continuará caindo ao longo dos anos e poderá chegar a comprometer seriamente o recurso subterrâneo.

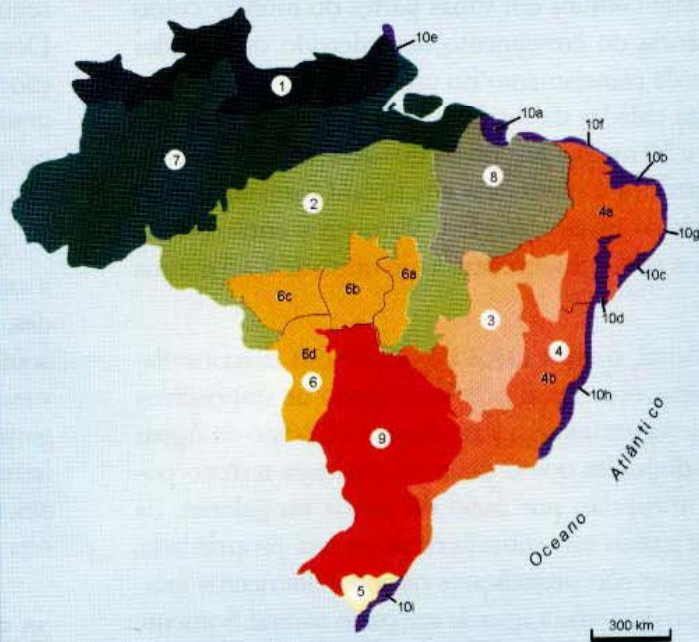
Quando a extração de água do aquífero supera a recarga em períodos muito prolongados, ou quando o bombeamento está concentrado em uma pequena zona, ocorre a **superexploração**, ou seja, a retirada de água do aquífero se dá em quantidades maiores que a sua reposição, acarretando desequilíbrios no balanço entre as entradas de água no aquífero (recarga) e as saídas (extração). Devido ao grande armazenamento do aquífero, este pode ser, durante períodos específicos, explorado em volumes maiores que a sua recarga sem problemas, desde que isso ocorra de forma estudada e planejada.

As conseqüências da exploração irracional normalmente estão associadas aos seguintes problemas, alguns já interpretados no Cap. 7:

- redução na capacidade produtiva individual do poço ou de poços próximos, com aumento nos custos de bombeamento;
- indução de fluxos laterais de água salina da costa marítima;
- infiltração de água subterrânea de baixa qualidade advinda de outras unidades aquíferas mais superficiais;
- drenagem de rios e outros corpos de água superficial, pelo rebaixamento do nível hidráulico do aquífero;
- subsidência do terreno, resultando em problemas de estabilidade e danos de edificações e rede de esgoto.

20.1 Quanto de água subterrânea tem o Brasil?

Os 8.512.000 km² do território nacional podem armazenar um volume superior a 112.000 km³ de água subterrânea. Esta colossal quantidade de água poderia abastecer a população do planeta durante 250 anos. Infelizmente, nem toda a água subterrânea pode ser extraída, tampouco a sua distribuição é equitativa em todo o País. Diferentes rochas têm diferentes capacidades de armazenar e transmitir água. Em certas áreas, o regime climático limita a recarga dos aquíferos, reduzindo a sua produção. As grandes províncias hidrogeológicas do País e as suas principais características aquíferas estão na Fig. 20.5.



Províncias hidrogeológicas do Brasil
(DNPM/CPRM, 1983)

PROVÍNCIA HIDROGEOLÓGICA	DOMÍNIO AQUÍFERO	SISTEMA AQUÍFERO PRINCIPAL	VOLUME DE ÁGUA (km ³)	VAZÃO/ POÇO (m ³ /h)			
1 ESCUDO SETENTRIONAL	Área cristalina exposta e rochas alteradas	Zonas fraturadas	80	< 1-5			
2 ESCUDO CENTRAL							
3 SÃO FRANCISCO							
4 ESCUDO ORIENTAL 4a - Nordeste 4b - Sudeste							
5 ESCUDO MERIDIONAL		Manto de rocha alterada e/ou fraturada	10.000	5 - 10			
6 CENTRO OESTE 6a - Ilha do Bananal 6b - Alto Xingu 6c - Chapada dos Parecis 6d - Alto Paraguai							
7 AMAZONAS	Bacia Sedimentar do Amazonas				Barreiras Alter do Chão	32.500	10 - 400
8 PARAÍBA	Bacia Sedimentar do Maranhão				Itapecuru Cordas-Grajaú Motuca Poti-Plaiú Cabeças Serra Grande	17.500	10 - 1000
9 PARANÁ	Bacia Vulcano - Sedimentar do Paraná (porção brasileira)	Bauru Serra Geral Guarani (Botucatu-Pirambóia) Rio do Rastro Furnas Aquidauana	50.400	10 - 700			
10 COSTEIRA	10a - Barreirinhas	Bacia Sedimentar São Luis - Barreirinha	São Luis	250	10 - 150		
	10b - Potiguar	Bacia Sedimentar Potiguar - Recife	Barreiras Jandaíra	230	5 - 550		
	10c - Alagoas e Sergipe	Bacia Sedimentar Alagoas - Sergipe	Barreiras Marituba	100	10 - 350		
	10d - Recôncavo, Tucano e Jatobá	Bacia Sedimentar Jatobá - Tucano - Recôncavo	Marizal São Sebastião Tacaratu	840	10 - 500		
	10e - Amapá 10f - Ceará e Piauí 10g - Pernambuco, Paraíba e Rio Grande do Norte 10h - Rio de Janeiro, Espírito Santo e Bahia 10i - Rio Grande do Sul	Depósitos diversos	Aluviões e dunas	411	2-40		

Fig. 20.5 As águas subterrâneas no Brasil. Fontes: DNPM/CPRM, 1983 e Rebouças, 1999.

Problemas de extração não controlada em aquíferos são bastante comuns em várias partes do mundo, como consequência do crescimento desordenado das cidades e da falta de planejamento no uso dos recursos hídricos. Em várias cidades da Ásia têm sido observadas quedas entre 20 e 50 metros nos níveis dos aquíferos. A situação mais dramática é observada em León-Guanajuato, México, onde os níveis desceram 90 metros entre 1960 e 1990 e nos anos subseqüentes a um ritmo de 1 a 5 metros por ano.

No Brasil, muitos casos de perfuração descontrolada de poços ocorreram pela inexistência de dispositivos legais que regulamentem a atividade. O Código de Águas de 1934 dispunha que o dono de qualquer terreno poderia se apropriar, por meio de poços ou galerias, da água que existia em subsuperfície na sua propriedade, contanto que não prejudicasse os aproveitamentos existentes, nem derivasse a água de seu curso natural. Somente com a Constituição Federal de 1988 e com as leis decorrentes, a água subterrânea passou a ser considerada bem de domínio dos Estados, possibilitando o efetivo gerenciamento da reserva hídrica subterrânea.

Mesmo em áreas onde as propriedades contam com rede de água tratada, a perfuração de poços para uso privado é bastante comum, sobretudo para indústrias, empresas e condomínios residenciais. Esta prática é motivada pela economia direta desta fonte alternativa e/

ou pela possibilidade de contar com uma fonte adicional segura, em áreas onde o fornecimento não é regular. Devido à falta de disciplina nas autorizações de perfuração e de exploração de poços na maioria dos países, a grande densidade de poços em núcleos urbanos acaba provocando problemas de superexploração e redução dramática dos níveis dos aquíferos.

A urbanização causa a impermeabilização do solo e a expulsão das áreas verdes agrícolas em torno das cidades, o que acaba por reduzir a infiltração e a recarga do aquífero. Por outro lado, as perdas de água potável por vazamento da rede de distribuição, que facilmente chegam a 45% do volume total, contribuem de forma bastante eficiente com a recarga do aquífero. Muitas vezes, a urbanização faz com que a contabilidade hidráulica seja mais favorável ao aquífero.

20.5.2 Intrusão salina

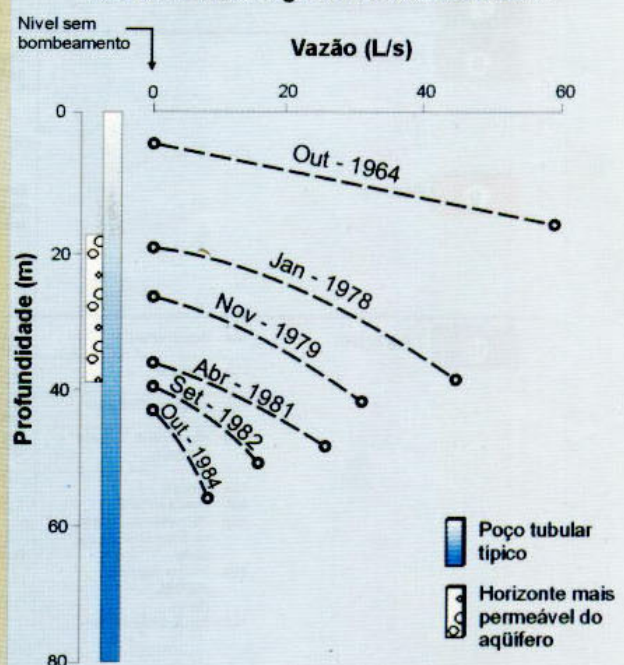
Nas áreas costeiras, os aquíferos normalmente descarregam suas águas no mar. Existe um equilíbrio dinâmico entre as águas subterrâneas, de baixo conteúdo salino, e as águas salgadas que saturam as rochas ou sedimentos sob o mar. Quando este equilíbrio se rompe, através do bombeamento de poços, por exemplo, há a invasão da água marinha salina no interior do aquífero, causando a sua degradação.

20.2 Superexploração de aquífero

Na América Latina, um dos mais importantes exemplos de superexploração de aquífero pode ser observado na Área Metropolitana de Lima (Peru). Em 1985, 264 poços tubulares municipais extraíam mais de 208Mm³/a de água de um sistema aquífero livre (alúvio-coluvionar) de grande produtividade. A falta de planejamento de uso do recurso tem causado problemas de queda dos níveis do aquífero, que implicam poços de maior profundidade e maior dispêndio de energia elétrica. Em 1964, os níveis de água eram quase aflorantes e, em menos de 20 anos, desceram 40 metros, exaurindo os horizontes aquíferos mais permeáveis. A produção média, de 43-60L/s (154-216m³/h) por poço em 1964, caiu para menos de 25 L/s (90m³/h) em 1984. Em 1975 gastava-se 0,7 kW para produzir 1 m³ de água e dez anos após, 0,88kW/m³ (Fig. 20.6).

Fig. 20.6 Redução dramática na produção de poços públicos de abastecimento de água na cidade de Lima, Peru.

Queda no nível de água do aquífero entre 1964 e 1984 com diferentes regimes de bombeamento



A água do mar é mais densa que a água subterrânea. Isto faz com que uma cunha de água salgada se posicione sob a água doce do aquífero (Fig. 20.7). Obviamente o formato preciso dessa cunha, bem como suas dimensões, vai depender do fluxo da água subterrânea, do gradiente hidráulico do aquífero, da variação do nível do mar, do efeito de maré, da heterogeneidade e anisotropia do aquífero e, caso exista, da intervenção do ser humano.

Na virada do século XIX, os pesquisadores Ghyben e Herzberg, trabalhando independentemente, estabeleceram uma relação entre um aquífero livre, de porosidade primária, homogêneo e isotrópico e as águas do mar, com um modelo hidrostático, que levava em consideração apenas as densidades dos fluidos. Embora o modelo seja bastante simples, ele dá uma noção da sensibilidade deste sistema face ao bombeamento de poços na linha de costa. Segundo esses autores, o rebaixamento de apenas um metro do nível do aquífero, através da extração de um poço próximo à cunha salina, causaria uma ascensão ou intrusão de até 40 metros da água salgada.

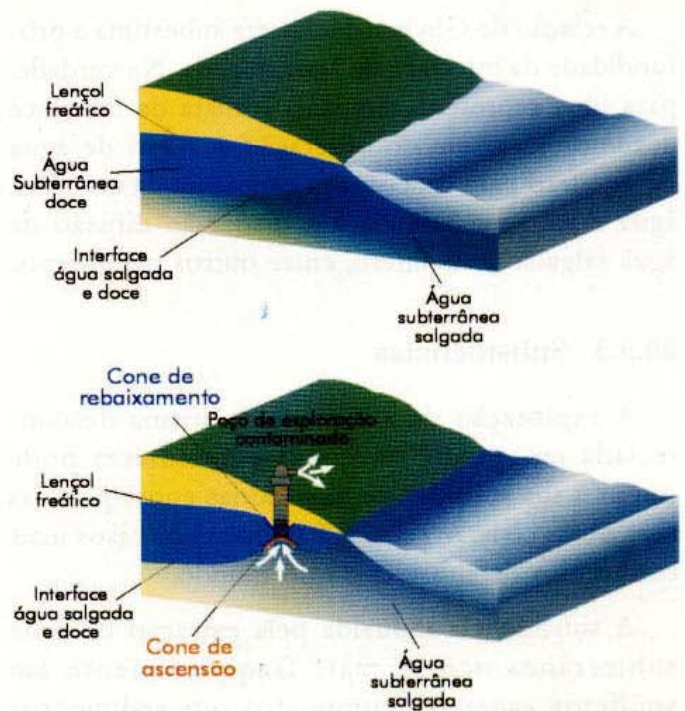


Fig. 20.7 Relação entre água subterrânea e água do mar em área de descarga de um aquífero livre. A extração de água subterrânea da linha de costa acaba por criar o avanço da água salgada em subsuperfície, processo chamado de intrusão salina.

Tabela 20.6 Áreas de subsidência causada pelo bombeamento excessivo de água subterrânea.

Localidade	Subsidência máxima (m)	Área de subsidência (km ²)	Principais períodos de ocorrência
Japão			
Osaka	3	190	1928 – 68
Tóquio	4	190	1920 – 70
México			
Cidade do México	9	130	1938 – 70
Taiwan			
Taipei	1 – 3	130	1961 – 69
EUA			
Arizona Central	2 – 3	650	1948 – 67
Califórnia			
Vale de Sta Clara	4	650	1920 – 70
Vale de San Joaquin	3 – 9	1.000	1935 – 70
Lancaste	1	400	1955 – 67
Nevada			
Las Vegas	1	500	1935 – 63
Texas			
Houston-Galveston	1 – 1,5	8.860	1943 – 64
Louisiana			
Baton Rouge	0,3	650	1934 – 65

A relação de Ghyben-Herzberg subestima a profundidade da interface da água salgada. Na verdade, para uma representação mais realista da interface devemos levar em consideração o fluxo de água do aquífero para o oceano, a espessura da interface água doce-água salgada e a dispersão-difusão da água salgada no aquífero, entre outros parâmetros.

20.5.3 Subsidiências

A exploração de aquíferos de forma descontrolada em alguns terrenos sedimentares pode causar a sua subsidência, com sérias conseqüências para obras civis. A Tabela 20.6 mostra os casos mais conhecidos de subsidência no mundo.

A subsidência induzida pela extração de água subterrânea ocorre mais frequentemente em aquíferos espessos, compostos por sedimentos pouco consolidados, formados pela intercalação de camadas aquíferas, mais arenosas, e aquíferas (camadas de baixa permeabilidade), mais argilosas. A extração de água do aquífero se dá preferencialmente pelas camadas mais arenosas, drenando

verticalmente a água dos aquíferos. Duas pressões atuam sobre o aquífero: a pressão hidrostática, representada pela carga hidráulica e a tensão efetiva, resultante da massa de sólidos que compõe as camadas confinantes do aquífero. A extração de água reduz as pressões hidrostáticas e isto acaba por impor ao sedimento uma carga maior (tensão efetiva), que compacta o meio aquífero, reduzindo os espaços porosos. A compactação é pouco eficiente em materiais grossos como areias e cascalhos, mas é até três ordens de magnitude mais importante em argilas.

Outro problema associado ao bombeamento de aquíferos ocorre em terrenos cársticos. Neste caso, o mecanismo é mais simples e está relacionado ao colapso de vazios em rocha calcária que eram parcialmente suportados pela água no seu interior. Com a extração e não reposição da água nessas cavidades, aumenta o risco do teto ceder às pressões das porções superiores. Tal problema foi dramaticamente vivenciado na cidade de Cajamar, no interior de São Paulo, na década de 1990, conforme detalhado no Cap. 7.

20.3 Subsidiência na Cidade do México

A Cidade do México tem vivenciado sérios problemas de subsidência associada à exploração descontrolada do aquífero. As duas fotos foram tiradas do mesmo local, mas em datas distintas. A primeira na década de 1910 e a segunda em 1995. É possível notar que a avenida, por onde circulavam os antigos carros, estava na mesma altura da base da estátua. 30 anos depois, uma escadaria de mais de 2,5 m foi construída para se ter acesso ao mesmo nível da estátua. A avenida abaixou em relação à estátua, que tem a sua fundação em rochas mais estáveis e não passíveis de subsidência (Fig. 20.8).

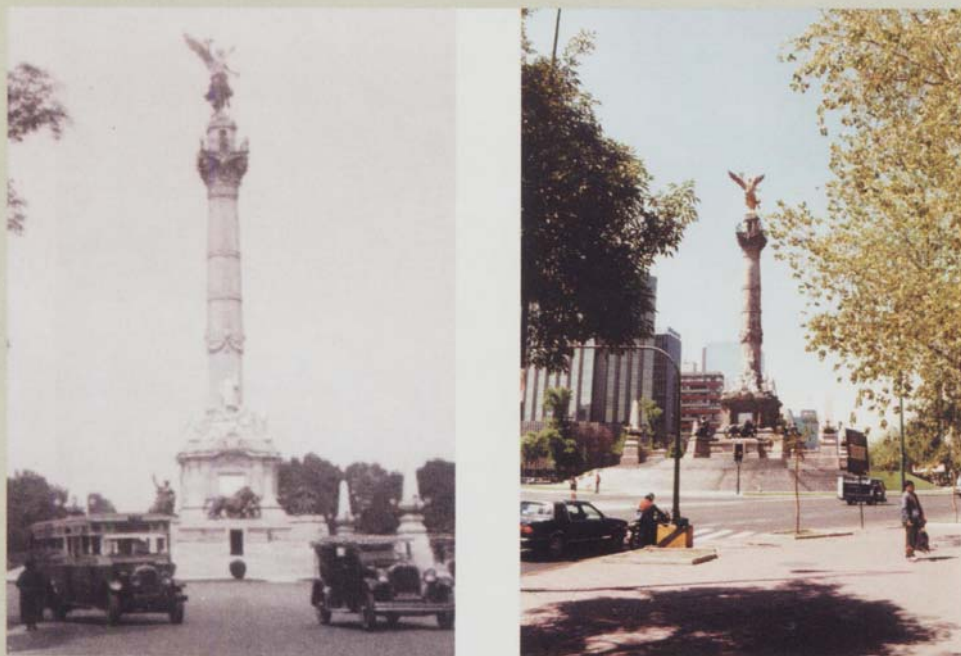


Fig. 20.8 Subsidiência na Cidade do México causada pela extração de água subterrânea. Pode-se notar o rebaixamento do nível da avenida em relação à base da estátua. Fotos: Instituto Nacional de Bellas Artes y Literatura, México, e R. Hirata.







20.6 A Contaminação da Água Subterrânea

A água subterrânea apresenta geralmente excelentes qualidades químicas e físicas, sendo apta para o consumo humano, muitas vezes sem tratamento prévio. A contaminação ocorre quando alguma alteração na água coloca em risco a saúde ou o bem estar de uma população.

Entre os compostos inorgânicos, o nitrato é o contaminante de ocorrência mais ampla em aquíferos. As fontes mais comuns deste contaminante são os sistemas de saneamento *in situ* (fossas e latrinas) e a aplicação

de fertilizantes nitrogenados na agricultura. A grande preocupação ambiental associada ao nitrato está no fato dele possuir grande mobilidade e persistência em condições aeróbicas. Os metais pesados (incluindo cádmio, cromo, chumbo e mercúrio) apresentam baixa mobilidade em muitos ambientes naturais. Este comportamento pode ser alterado sob forte mudança nas condições físico-químicas (pH e Eh). Os compostos orgânicos sintéticos são, pela toxicidade, aqueles de maior preocupação ambiental. Os padrões de potabilidade existentes não cobrem a totalidade das substâncias utilizadas pela sociedade industrial. Isso decorre da insuficiente evidência médica que permita o estabelecimento de recomendações seguras.

Tabela 20.7 Exemplos de alguns casos de contaminação de aquíferos envolvendo solventes halogenados altamente tóxicos em aquíferos permeáveis.

Local e mapa da pluma contaminante 2,5 km Fluxo →	Fonte provável	Contaminante predominante	Volume da pluma (litros)	Volume estimado do contaminante lançado no aquífero (litros)
 Ocean City, New Jersey	Indústria Química	Tricloroetileno 1,1,1-Tricloroetano Tetracloroetileno	5.700.000.000	15.000
 Mountain View, California	Indústria Eletrônica	Tricloroetileno 1,1,1-Tricloroetano	6.000.000.000	9.800
 Cape Cod, Massachusetts	Drenos de infiltração de esgoto	Tricloroetileno Tetracloroetileno	40.000.000.000	1.500
 Gloucester, Ontario	Aterro sanitário	1,4-Dioxano Freon 113	102.000.000	190
 San Jose, California	Indústria Eletrônica	1,1,1-Tricloroetano Freon 113 1,1-Dicloroetileno	5.000.000.000	130
 Denver, Colorado	Aeroporto	1,1,1-Tricloroetano Tricloroetileno Dibromocloropropano	4.500.000.000	80

Alguns compostos orgânicos halogenados, utilizados amplamente como solventes e desengraxantes, e alguns hidrocarbonetos podem causar problemas irremediáveis aos aquíferos. Estes compostos são altamente tóxicos e bastante persistentes em subsuperfície. Devido a suas características físicas, os primeiros são geralmente mais densos que as águas (DNAPL: *dense non-aqueous phase liquid*) e os outros, menos densos (LNAPL: *light non-aqueous phase liquid*). Como apresentam baixa solubilidade geralmente acabam por criar uma fase imiscível que afunda ou flutua no aquífero, de acordo com o composto. A remoção total desses compostos em meios porosos, principalmente quando frações argilosas estão presentes, é praticamente impossível. Não existe ainda tecnologia disponível que permita que aquíferos seriamente contaminados por esses produtos sejam remediados. A preocupação ambiental ainda é maior quando se verifica que pequenas quantidades desses líquidos podem gerar grandes volumes de aquíferos contaminados, conhecidos como **plumas contaminantes** (Tabela 20.7). Um exemplo impressionante foi o ocorrido em San Jose (Califórnia, EUA), onde apenas 130 litros de solventes geraram uma pluma de 5.000.000.000 litros.

Outros contaminantes bastante comuns nas águas subterrâneas são os microorganismos patogênicos, incluindo as bactérias e vírus. Para a medição da qua-

lidade da água tanto superficial como subterrânea, é usado o padrão de contagem de coliformes. Embora estas bactérias sejam inofensivas ao homem, elas são usadas devido a sua grande abundância nas fezes de animais. Portanto a detecção de coliformes nas águas é um indicador de contaminação recente.

Embora esse padrão seja mundialmente aceito e disseminado, para as águas subterrâneas ele é bastante limitado. Essas bactérias sobrevivem em aquíferos, em média uma semana, contra mais de 200 dias de alguns vírus patogênicos, fazendo com que muitas vezes a sua ausência não exclua problemas de qualidade da água por outros microorganismos patogênicos mais persistentes.

Eventualmente, a contaminação das águas subterrâneas pode ocorrer por mecanismos naturais. A interação entre a água e a rocha faz com que a água se enriqueça de certas substâncias, algumas das quais em concentrações que a tornam não potável. Estes problemas, embora não tão comuns, ocorrem em aquíferos onde a matriz mineral apresenta concentração elevada dessas substâncias e o ambiente freqüentemente propicia a sua solubilização. Os contaminantes mais comuns são ferro, manganês e flúor, e em concentrações menores arsênio, cromo, cádmio, níquel, zinco, cobre, entre outros.



Fig. 20.9 Perfil de degradação do solo e zona saturada e não-saturada. A espessura da linha corresponde a maior ou menor atuação do processo indicado.

Uma das mais graves contaminações de origem natural, envolvendo arsênio, ocorreu em Bangladesh. Um programa coordenado pelas Nações Unidas perfurou milhares de poços nos vales deltáicos daquele país, como alternativa para o abastecimento de água de população ali residente, que anteriormente extraía água diretamente de rios contaminados. A exploração dos aquíferos rebaixou os níveis freáticos, que induziu a oxidação do sedimento. Esta alteração do ambiente físico-químico acabou por solubilizar o arsênio, que contaminou milhares de pessoas causando problemas graves de saúde.

Água subterrânea contendo elevada concentração de flúor tem sido detectada na bacia sedimentar do Paraná. Vários poços, inclusive de grande profundidade explorando o Sistema Aquífero Guarani (formações Botucatu-Pirambóia), estão inoperantes ou sendo sub-utilizados por esta razão. Embora vários estudos tenham sido realizados, ainda existem muitas dúvidas sobre a origem desse íon na água.

O solo participa ativamente da atenuação de muitos, mas não todos, contaminantes da água subterrânea. O processo de atenuação continua em menor grau na zona não-saturada, especialmente onde sedimentos não consolidados, em oposição a rochas fraturadas (pouco reativas), estão presentes (Fig. 20.9). Tanto o solo como a zona não-saturada são a primeira linha de defesa natural contra a poluição da água subterrânea. Isto ocorre não somente pela sua posição estratégica, mas também pelo ambiente mais favorável à atenuação e eliminação de poluentes e pela presença de grande quantidade de microorganismos.

A água na zona não-saturada movimenta-se normalmente de forma lenta, restrita aos menores poros. As velocidades geralmente não excedem a 0,2m/dia em curtos períodos de tempo e menores ainda para períodos mais longos. As condições químicas geralmente são aeróbicas e freqüentemente alcalinas, permitindo:

- a) interceptação, sorção e eliminação de microorganismos patogênicos,
- b) degradação da carga de metais pesados e outros químicos inorgânicos, através da precipitação (como carbonatos, sulfatos e hidróxidos), sorção e trocas iônicas e
- c) sorção e biodegradação de muitos hidrocarbonetos sintéticos e naturais.

Tais processos continuam, em menor grau, na zona saturada. Nesta zona a redução das concentrações ocorre principalmente pela diluição, resultado da dispersão que acompanha o fluxo da água subterrânea.

A atenuação de contaminantes não é a mesma para todos os aquíferos. Algumas unidades oferecem melhor proteção que outras, devido às características litológicas e hidráulicas da zona não-saturada ou do aquífero. Desta forma, a **vulnerabilidade à poluição** de um aquífero é uma característica intrínseca que determina a sensibilidade do aquífero em ser contaminado.

20.6.1 Causas Antrópicas da Poluição de Aquíferos

Uma lista das principais fontes potencialmente contaminantes é apresentada na Tabela 20.8. As atividades mais importantes no contexto latino americano são os sistemas de saneamento *in situ*, ou aquelas que infiltram os efluentes diretamente no solo, como deposição incorreta de resíduos sólidos, vazamento de postos de gasolina, entre outras.



Fig. 20.10 Contaminação da água subterrânea por fossas sépticas e negras.

Áreas urbanas sem rede de esgoto

Sistemas *in situ* de esgotamento sanitário, como fossas sépticas, latrinas, fossas ventiladas e secas, entre outras, são adequadas para a disposição de efluentes domésticos em zonas rurais, vilas e pequenas cidades a um custo bastante reduzido, comparativamente a redes de esgoto e estações de tratamento de efluentes.

Os efluentes domésticos municipais possuem elevadas concentrações em carbono orgânico, cloreto, nitrogênio, sódio, magnésio, sulfato e alguns metais, incluindo ferro, zinco e cobre, além de concentrações variadas de microorganismos patogênicos. Destes compostos, os que apresentam os maiores riscos à água subterrânea são o nitrogênio e os microorganismos patogênicos (Fig. 20.10).

Tabela 20.8 Atividades antrópicas potencialmente poluidoras do aquífero, mais comuns na América Latina.

Atividades	Característica da carga contaminante	
	Distribuição	Principal contaminante
URBANA (a)		
Saneamento <i>in situ</i>	u/r P-D	n f o
Lagoas de oxidação	u/r P	o f n m
Lixiviados de lixões/aterros sanitários	u/r P	o s h m
Tanques de combustível	u/r P-D	o
INDÚSTRIA		
Vazamento de tanques/tubos (b)	u P-D	o h
Derramamento acidental	u P-D	o h
Lagoas de efluentes	u p	o h s m
Lixiviado de resíduos sólidos (chorume)	u/r P	o h s m
AGRÍCOLA (c)		
i - Áreas de cultivo		
- com agroquímicos	r D	n o
- e com irrigação	r D	n o s
- com lodos/resíduos	r D	n o s
ii - Beneficiamento de gado e animais		
- lagoas de efluentes sem revestimento	r P	f o n

(a) Pode incluir componentes industriais

(b) Pode também ocorrer em áreas não industriais

(c) Intensificação apresenta aumento no risco de contaminação

u/r Urbano/Rural - P/L/D Pontual/linear/difuso

n Nutrientes

f Patógenos fecais

o Compostos orgânicos sintéticos e/ou carga orgânica

s Salinidade

m Metais pesados

h Hidrocarbonetos

Compostos nitrogenados nos dejetos humanos podem causar uma persistente e extensa contaminação em aquíferos freáticos em zonas urbanas e peri-urbanas. Por exemplo, uma área de densidade populacional de 20 pessoas por hectare pode gerar uma carga de 100 kg/ha/ano de nitrogênio que, se oxidado por 100 mm/a de infiltração de água de chuva, poderia resultar em uma recarga local ao aquífero de 100 mg/L de nitrato, ou seja, quase 10 vezes maior que o padrão de potabilidade aceito para água. Na prática, a proporção de nitrogênio depositado que será lixiviado é desconhecida, bem como a sua diluição e redução química, devido a vários processos que ocorrem em subsuperfície. Entretanto, o exemplo demonstra que áreas sem rede de esgoto, mesmo em climas bastante úmidos, podem ser alvos de contaminações significativas. Em áreas mais secas, onde o fluxo regional é menor, a concentração do contaminante na água infiltrada pode ser ainda maior.

Atividades industriais

A atividade industrial contamina os aquíferos quando seus efluentes líquidos, gasosos e resíduos sólidos são

depositados (estocados) incorretamente (Fig. 20.11). O armazenamento de matérias primas também poderá contaminar o solo e as águas subterrâneas.

Não são necessariamente as indústrias causadoras dos maiores problemas das águas superficiais que representam o maior perigo para as águas subterrâneas. O lançamento de efluentes com altos valores de DBO (demanda bioquímica de oxigênio), que causa a mortalidade de peixes na água superficial, representa uma menor preocupação aos aquíferos, devido à alta capacidade depurativa do solo em relação a este contaminante. Da mesma forma, pequenas indústrias e oficinas mecânicas que manuseiam compostos tóxicos sem muito cuidado podem causar sérias contaminações ao subsolo, sem atingir contudo os corpos de água superficial. As dificuldades na identificação e fiscalização desses pequenos empreendimentos complicam a implementação de programas eficazes de proteção das águas subterrâneas.

Uma prática muito comum é a utilização de lagoas para a estocagem, manuseio, evaporação, sedimentação e oxidação de efluentes industriais e sanitários. A grande maioria dessas lagoas tem uma base em terre-

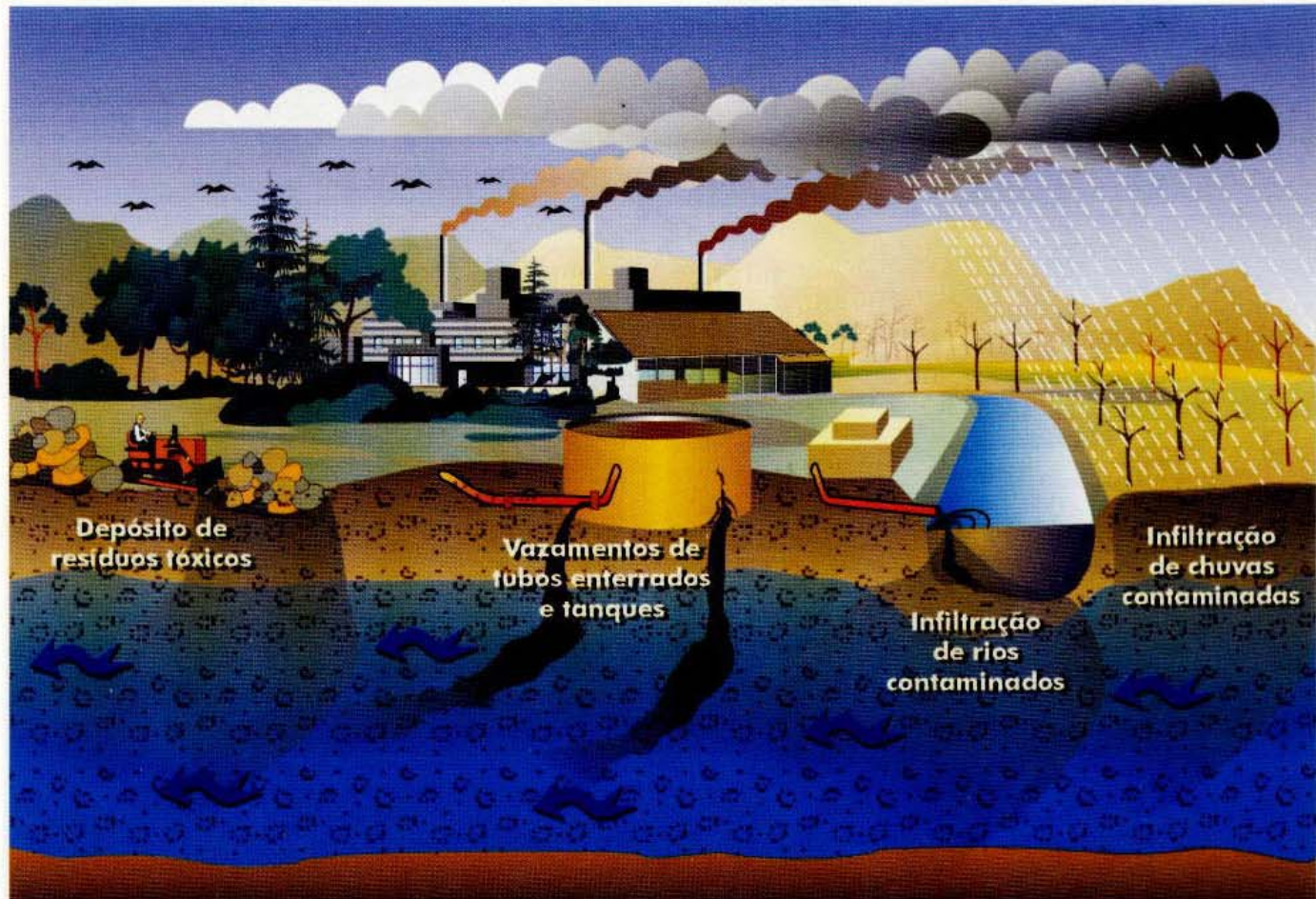


Fig. 20.11 Contaminação da água subterrânea pela atividade industrial.

no natural, que, em certo grau, é impermeabilizado pela compactação ou pela sedimentação dos sólidos trazidos pelos efluentes. Tal condição, entretanto, não é capaz de evitar uma infiltração, que em alguns casos é maior que 20 mm/dia, e a freqüente contaminação de aquíferos.

Resíduos sólidos

A deposição de resíduos sólidos de origem doméstica ou industrial tem causado muitos incidentes de contaminação na água subterrânea em nosso País, especialmente quando feita sem controle e quando a deposição, que muitas vezes envolve líquidos perigosos, é realizada em locais hidrogeologicamente vulneráveis (Fig. 20.12). No passado, vários resíduos foram enterrados para evitar a contaminação de águas superficiais e a exposição ao ar livre. Hoje, muitos destes depósitos estão poluindo os aquíferos.

Em vários casos, resíduos industriais perigosos, que podem conter metais pesados e solventes orgânicos, são colocados em áreas destinadas aos resíduos domésticos. Outras vezes, a deposição clandestina de substâncias tóxicas, comum em muitas regiões, difi-

culta a avaliação precisa dos riscos para o aquífero e da qualidade dos líquidos que percolam através do lixo (chorume).

A construção de aterros de resíduos sólidos tem de obedecer a normas mínimas, regidas por legislação. A obra deve ser bem localizada em relação aos aquíferos existentes e aos corpos de água superficial. Atualmente, estudos hidrogeológicos prévios são necessários e, quando da construção, é exigida uma camada inferior impermeável de argila de 0,6 a 1,5m de espessura e um recobrimento diário de 0,1 a 0,3m de solo compactado. Algumas vezes é necessária a colocação de camadas de material sintético, de grande resistência mecânica e química, para garantir a completa vedação hidráulica do empreendimento. Drenos superficiais são necessários para escoar águas de chuva, e diminuir a infiltração no núcleo do aterro.

Atividades agrícolas

Como consequência do aumento do uso de fertilizantes inorgânicos, depois da II Guerra Mundial, muitos solos, anteriormente pobres em nutrientes, passaram a conter intermitentemente excessos de sais,

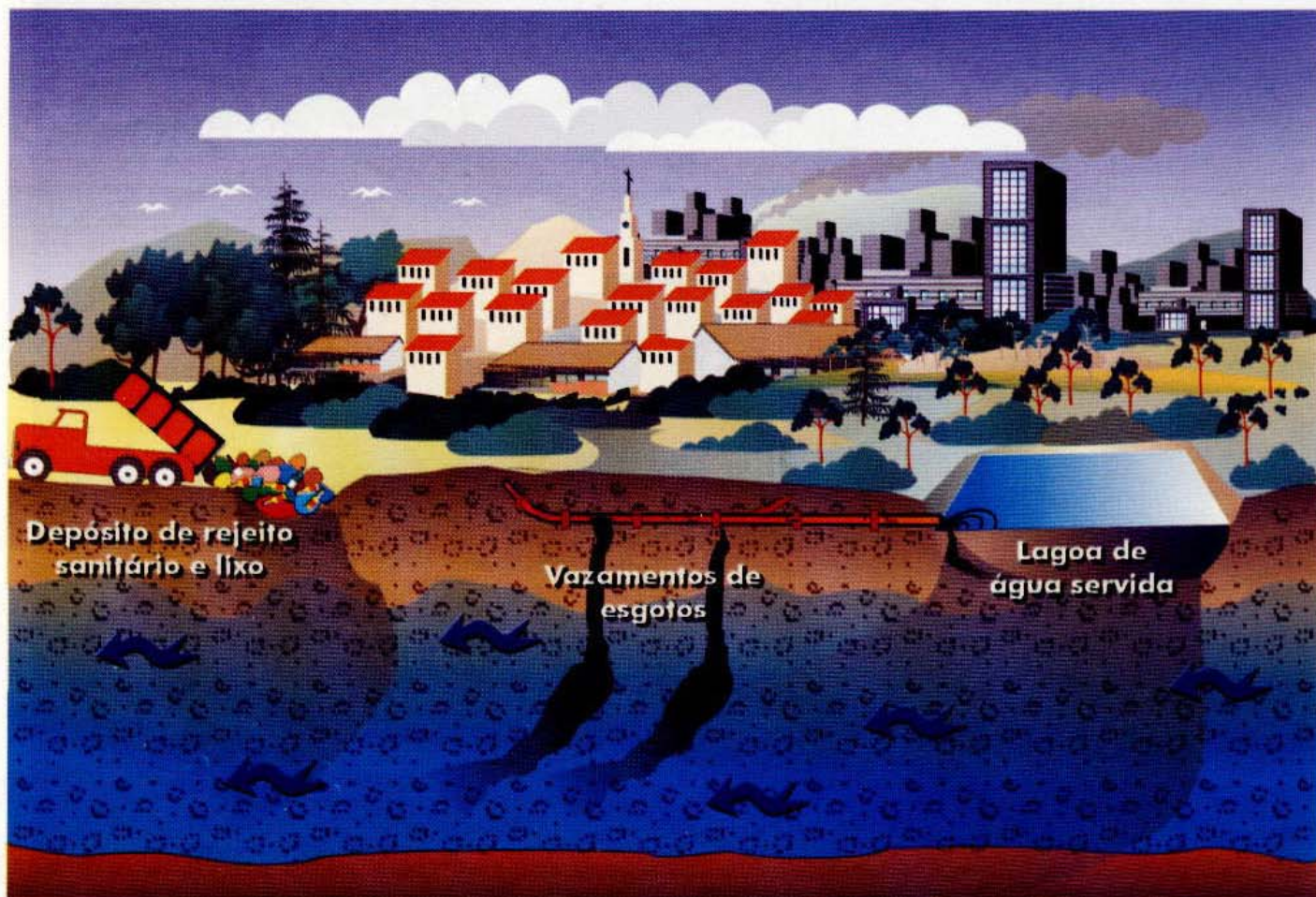


Fig. 20.12 Contaminação da água subterrânea pela deposição incorreta de resíduos sólidos e pelas perdas da rede de esgoto.

compostos nitrogenados e outros produtos que, uma vez mobilizados pela água infiltrada, podem atingir os aquíferos. Sérios problemas associados aos fertilizantes nitrogenados são observados em várias partes do mundo, incluindo nos países do oeste europeu e na América do Norte (Fig. 20.13).

O comportamento pouco conhecido de agrotóxicos (herbicidas, inseticidas, fungicidas, acaricidas, entre outros) em subsuperfície, associado às baixas concentrações e à sua ampla aplicação, faz da atividade agrícola uma das mais difíceis de serem avaliadas em termos de riscos hidrogeológicos. Com as facilidades analíticas das instituições de controle ambiental, iniciou-se uma ampla monitoração da água subterrânea em muitos países da América do Norte e Europa na década de 1990. Os resultados mostram que mais de 70 agrotóxicos foram detectados, mas na maioria dos casos, em concentrações seguras, inferiores aos padrões de potabilidade. O número de trabalhos desenvolvidos ainda é insuficiente para permitir a caracterização satisfatória de impactos causados por agrotóxicos, fazendo com que estes contaminantes mereçam estudos mais detalhados.

Extrativismo mineral

A extração de minérios que mais preocupa os recursos hídricos subterrâneos está ligada aos bens minerais metálicos, à exploração de petróleo e gás e a algumas substâncias não-metálicas muito solúveis. Estes materiais representam perigo para os aquíferos devido às suas características de solubilidade e toxicidade ou por estarem associados a processos de beneficiamento que podem gerar substâncias perigosas.

Mesmo quando o bem mineral explorado representa pouco risco hidrogeológico, podem ocorrer impactos sobre a água subterrânea devido a perturbações hidráulicas, diretas ou indiretas, deposição de líquidos com alto conteúdo salino ou lixiviação do material estéril removido durante a extração. Quando campos de petróleo e jazidas de bens minerais estão localizados sob aquíferos importantes, deve haver um cuidado especial durante a construção de obras de acesso à mina ou dos poços de petróleo para isolar os aquíferos mais importantes.

Os bens minerais não-metálicos, por exemplo, de emprego imediato na construção civil, apresentam

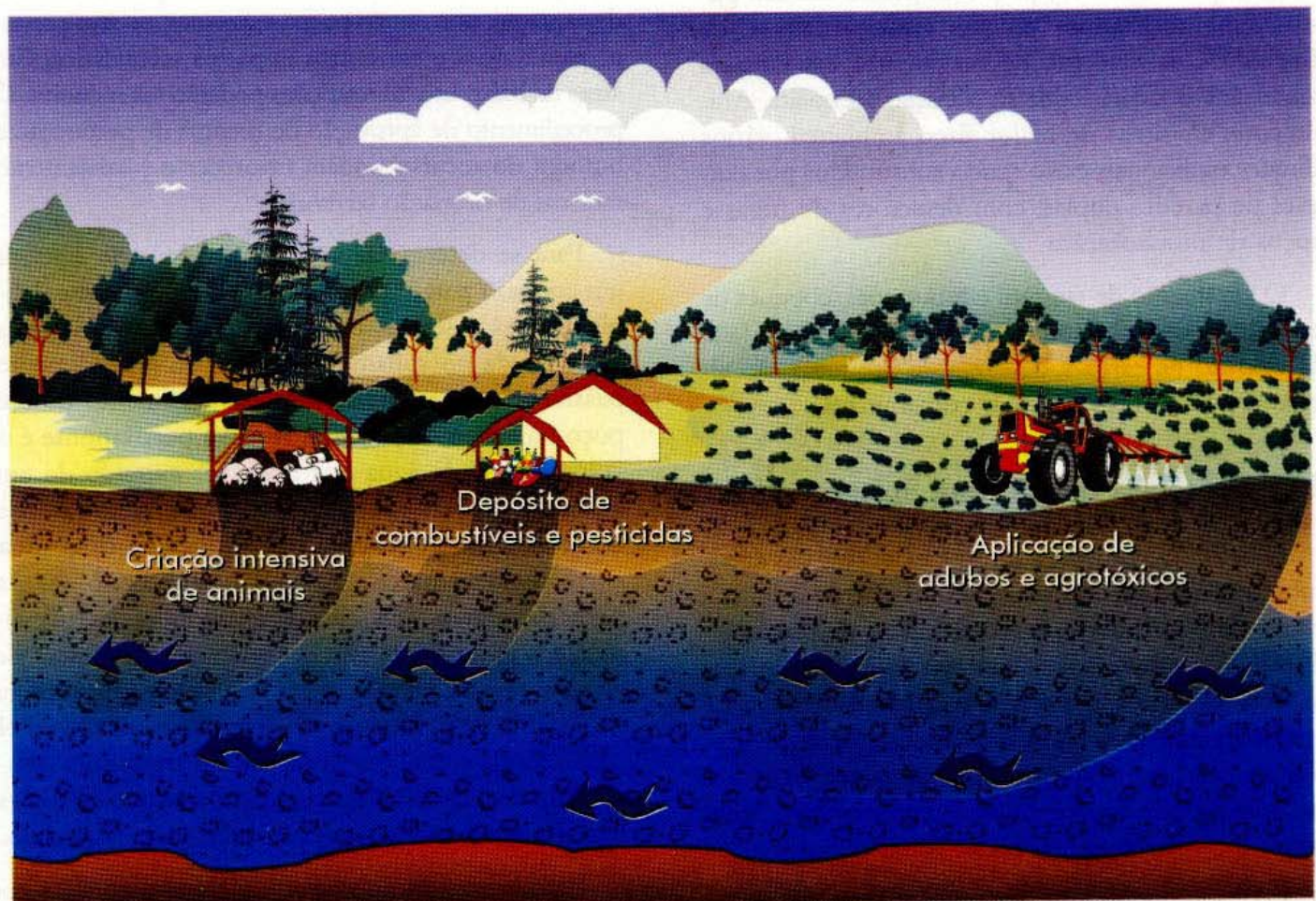


Fig. 20.13 Contaminação da água subterrânea em área agrícola, provocada pela aplicação de fertilizantes e agrotóxicos.

baixo potencial gerador de cargas contaminantes, uma vez que compreendem substâncias não-perigosas e muitas vezes inertes. O risco maior está relacionado à remoção do solo e da camada não-saturada, expondo muitas vezes o nível freático, o que não só reduz a capacidade de degradação dos contaminantes no perfil geológico como aumenta a vulnerabilidade do aquífero à poluição.

Acidentes ambientais e tanques enterrados

Um dos mais freqüentes casos de contaminação de aquíferos em centros urbanos refere-se a tanques enterrados contendo líquidos perigosos, incluindo os combustíveis. Estatísticas na Holanda, por exemplo, mostraram que até o ano de 1985, os postos de serviço foram responsáveis por mais de 30% dos casos de contaminação, seguidos de perto pelos resíduos sólidos, muito embora não fossem os casos mais graves de degradação de aquíferos naquele país.

O grande número de contaminações por postos de serviço decorre da quantidade de empreendimentos, da estocagem de produtos perigosos e altamente tóxicos, que mesmo em pequenas perdas causam potencialmente grandes plumas contaminantes, da dificuldade da detecção de vazamentos em tanques subterrâneos e da falta de fiscalização adequada. Atualmente, em áreas de maior risco ambiental, vários tanques tradicionais estão sendo substituídos por tanques de paredes duplas, com detectores de fugas e poços de monitoração.

O vazamento de tanques e tubulações, choques de caminhões transportando compostos perigosos, falta de cuidado na carga e descarga de produtos são alguns dos possíveis vetores de contaminação.

20.7 Proteção das Águas Subterrâneas

O uso cada vez mais intenso e extensivo das águas subterrâneas em todo o mundo, decorrente da sua grande disponibilidade, menores custos de produção, distribuição e qualidade natural normalmente excelente, está levando a sociedade a se preocupar mais e mais com este recurso. A implementação de programas de proteção da quantidade e qualidade da água é bastante recente no mundo, mas apenas incipiente em países de economias periféricas, como o Brasil.

O ditado popular – “É melhor prevenir que remediar” – é diretamente aplicável às águas subterrâneas. Como

visto neste capítulo, uma forte contaminação por substâncias altamente tóxicas e persistentes pode tornar um aquífero irrecuperável em sua qualidade natural. Estudos para caracterizar a contaminação de um aquífero podem facilmente alcançar centenas de milhares de dólares enquanto sua recuperação, que muitas vezes é pouco eficiente, freqüentemente demanda dezenas de milhões de dólares. Da mesma forma, a intensa ocupação territorial, associada ao uso da água subterrânea torna o gerenciamento do recurso complexo. Definir programas de proteção é portanto permitir o uso racional e sustentável da maior reserva de água doce da Terra, em termos quantitativos e qualitativos.

20.7.1 Assegurando a quantidade das águas subterrâneas

O grande problema no gerenciamento da quantidade dos recursos hídricos subterrâneos é estabelecer o volume total explotável de um aquífero ou parte dele, sem que isso esgote o recurso. A estratégia mais comum é controlar a perfuração de novos poços e o regime de extração em áreas mais críticas, sempre baseada na recarga do aquífero, no rebaixamento causado pela nova obra de captação, nos outros poços existentes, no uso previsto para a água e em outros impactos secundários. Em áreas de baixo uso, as restrições poderão ser menores. O procedimento de aprovação de licenças de perfuração e outorga do recurso poderá favorecer o planejamento racional de ocupação territorial.

Para se determinar a disponibilidade de água de um aquífero para um uso qualquer é importante definir as suas reservas, ou seja, a quantidade de água armazenada no substrato rochoso ou no sedimento passível de ser utilizada pelo bombeamento de um poço ou grupo de poços. A **reserva permanente** é o volume total de água que pode ser extraído de um aquífero utilizando técnicas convencionais de bombeamento. A **reserva reguladora** ou **dinâmica** corresponde à parcela da água infiltrada no solo, a partir das chuvas, acrescida da água infiltrada artificialmente, a partir das perdas das redes de distribuição de águas e esgoto, ou seja, o próprio volume de recarga do aquífero. E finalmente, a **reserva explotável** corresponde a uma fração da reserva reguladora (usualmente de 25% a 75%), entendendo-se que extrações maiores que esta fração comprometeriam o recurso.

Em algumas áreas, mesmo que respeitando as reservas explotáveis, a extração efetuada por um conjunto

de poços pode, através do rebaixamento conjunto, comprometer o aquífero. Isto ocorre pois o conceito de reserva explotável é definido para o aquífero todo e não para problemas de interferência entre poços, onde a distância entre as obras de captação deve ser considerada. Neste caso, a autorização para a perfuração, concedida pelo órgão de gestão do recurso hídrico deverá vetar a construção de novos poços, apoiado em critérios de importância do usuário e estudos prévios da hidráulica do aquífero.

20.7.2 Assegurando a qualidade das águas subterrâneas

A análise das estratégias de proteção de qualidade de aquíferos em vários países revela duas linhas básicas de ação, muitas vezes independentes e baseadas no controle do uso da terra. A primeira linha restringe a ocupação do terreno a partir de cartas de vulnerabilidade à poluição do aquífero, proibindo ou autorizando a instalação de novas atividades potencialmente contaminantes segundo áreas de alta ou baixa vulnerabilidade. A segunda linha se baseia no estabelecimento de zonas ao redor de poços ou fontes de abastecimento com diferentes graus de restrição de ocupação, a partir da identificação de contribuições de água para o poço ou fonte (parte da área de recarga do aquífero), conjuntamente com o tempo de trânsito e o comportamento hidráulico do aquífero. Esta estratégia se apóia na idéia de que quanto mais próxima a atividade do poço, maior o perigo de contaminação. (Fig. 20.14).

Quando o poder público estabelece o zoneamento e o oficializa por meio de um instrumento legal, este zoneamento é chamado **perímetro de proteção de poço (PPP)**.



Fig. 20.14 Conceito de perímetro de proteção de poço. Controle da atividade antrópica em relação à proximidade do poço e da sua zona de contribuição ou de recarga.

Os PPPs são mais eficientes em aquíferos simples, homogêneos e isotrópicos e em pequenas áreas. A grande densidade de poços explorados de forma irregular dificulta a definição das zonas a serem protegidas. A estratégia de mapas de vulnerabilidade é melhor em áreas maiores, com a análise de um número relativamente grande de atividades potencialmente contaminantes e com a existência de uma quantidade reduzida de informação ou grande complexidade hidrogeológica. Esta técnica é mais adequada para planejar o uso e ocupação do solo e estabelecer prioridades de ação para a proteção do recurso, baseado no reconhecimento de áreas ou atividades de maior perigo de degradação de aquíferos.

O planejamento de uso do solo pode se dar de três formas, de acordo com a existência de fontes de contaminação antrópica: em áreas onde já se comprovou a contaminação de aquíferos por uma atividade específica (fontes herdadas), em áreas onde novas atividades potencialmente contaminantes serão instaladas e em áreas onde a ocupação já ocorreu, porém não foram detectados problemas de contaminação.

Em zonas altamente urbanizadas e industrializadas ou com intensiva atividade agrícola, a prioridade será na identificação de áreas ou atividades que apresentem os maiores riscos à poluição dos aquíferos. Para isto precisam ser identificadas e cadastradas as atividades antrópicas e estes dados confrontados com uma carta de vulnerabilidade à poluição de aquíferos ou com a localização das zonas de captura de poços e seus perímetros de proteção. O perigo maior será definido pela atividade que apresente maior potencial contaminante e que esteja locada em área de elevada vulnerabilidade do aquífero ou mais próxima de poços importantes. Em áreas degradadas de aquíferos, caracteriza-se o risco real para a população e para o meio ambiente. Este critério deverá nortear a decisão da remediação do aquífero e o grau de limpeza que se quer atingir. No terceiro caso, em áreas novas onde se planeja ocupar o solo, a implementação de atividades de reconhecido potencial poluente deverá ser precedida por estudos de impactos ao meio ambiente específicos, para definir as restrições que deverão ser impostas à atividade.

Em suma, a chave para o sucesso de qualquer programa de manejo e proteção dos recursos hídricos é a participação dos envolvidos, incluindo a sociedade civil, o contaminador e o Estado, através de seu órgão de controle ambiental.

Leituras recomendadas

CUSTODIO, E.; LLAMAS, R. *Hidrologia Subterránea*. Barcelona: Omega, 1981.

FEITOSA, F.; MANOEL FILHO, J. *Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações*. Fortaleza: CPRM, 1997.

FOSTER, S.; VENTURA, M.; HIRATA, R. Contaminación de las aguas subterráneas: un enfoque ejecutivo de la situación en América Latina y el Caribe en relación con el suministro de agua potable. Lima: *CEPIS Technical Paper*, 1987.

FREEZY, R. A.; CHERRY, J. A. *Groundwater*. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1979.

...de la contaminación de las aguas subterráneas en América Latina y el Caribe. Este enfoque ejecutivo analiza la situación actual y propone medidas para mejorar el suministro de agua potable. El texto está dirigido a los responsables de la gestión del agua y a los estudiantes de las universidades. El libro es una excelente referencia para quienes se interesan en el tema de la contaminación de las aguas subterráneas y su impacto en la salud pública y el medio ambiente.

...de la contaminación de las aguas subterráneas en América Latina y el Caribe. Este enfoque ejecutivo analiza la situación actual y propone medidas para mejorar el suministro de agua potable. El texto está dirigido a los responsables de la gestión del agua y a los estudiantes de las universidades. El libro es una excelente referencia para quienes se interesan en el tema de la contaminación de las aguas subterráneas y su impacto en la salud pública y el medio ambiente.

...de la contaminación de las aguas subterráneas en América Latina y el Caribe. Este enfoque ejecutivo analiza la situación actual y propone medidas para mejorar el suministro de agua potable. El texto está dirigido a los responsables de la gestión del agua y a los estudiantes de las universidades. El libro es una excelente referencia para quienes se interesan en el tema de la contaminación de las aguas subterráneas y su impacto en la salud pública y el medio ambiente.

