

IMPACTOS AMBIENTAIS NAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

Aldo da Cunha Rebouças *

INTRODUÇÃO

A água, embora represente apenas cerca de dez milionésimos da matéria constituinte da nossa Galáxia, encontra-se sob a forma de vapor ou gelo em todas as estrelas, planetas e cometas já conhecidos. Mas, o que se torna excepcional é a Terra ser o único planeta onde a água ocorre no estado líquido, desde há pelo menos 3,8 bilhões de anos, idade das rochas mais antigas formadas em ambientes subaquáticos.

Esta situação e os ecossistemas resultantes decorrem da posição da Terra em relação ao Sol, situando-se a 150 milhões de KM de distância. Porém, os ecossistemas evoluem de maneira contínua, como resultado de interações permanentemente reajustadas entre a atmosfera, litosfera, hidrosfera, biosfera, sob a influência das energias emanadas pelo Sol e ação da gravidade.

O fato de o ser humano, embora pertencendo à natureza, tê-la considerado como um mero estoque de recursos para ser desfrutado, dificulta sobremaneira a harmonização entre as atividades humanas e os ciclos naturais. Neste contexto, a água é o elemento natural distribuidor, integrador e purificador dos processos formadores do meio ambiente, bem como dos efeitos ou impactos engendrados pelas atividades humanas.

As massas de água da Terra estão em movimento permanente entre continentes, oceanos e atmosfera, sob a ação da energia solar e gravidade, constituindo o ciclo hidrológico.

Os grandes números que quantificam e descrevem o balanço hídrico da Terra são apresentados na Tabela 1.

O tempo de residência da água na atmosfera é

Tabela 1: Volumes de água da Terra

Reservatório	Volumes (E6 Km3)	Fluxos (E3 KM3/ano)	
Oceanos	1350	Evaporação	361
		Precipitação	324
Continentes	33.6	Evaporação	62
		Precipitação	99
Calotas polares e geleiras	25		
Solo e Subsolo	8.4	Descarga p/rios	3
Lagos e rios	0.2	Descarga total	41
Atmosfera	0.013		
Biosfera	0.0006		

Fonte: valores conforme citado em Peixoto

da ordem de uma semana e de dezenas de dias nos rios, enquanto atinge vários milhares de anos nas calotas polares e geleiras, aquíferos e oceanos.

A disponibilidade de água para consumo humano e para a agricultura, converte-se hoje num dos problemas mais preocupantes do planeta. O que está em jogo é a possibilidade de se imprimir uma mudança drástica na escalada de desperdício e degradação dos recursos hídricos e de se promover atividades sócio-econômicas com uma maior interação com os ciclos da natureza.

A problemática dos impactos ambientais e de seus efeitos nos recursos hídricos em geral e nas águas subterrâneas em particular, só será bem re-

*CEPAS-IG-USP

solvida tendo-se em conta a interdependência sistêmica de água e meio ambiente, imposta pelos processos físicos do ciclo hidrológico, e de que o binômio quantidade-qualidade é indivisível. Estes princípios constituem premissas básicas da pesquisa, do aproveitamento, planejamento e gerenciamento integrado dos recursos hídricos, para atendimento dos usos múltiplos. O balanço demandas/disponibilidades e/ou uso e proteção, são os indicadores básicos para manifestação favorável ou não à solicitação formulada.

A QUESTÃO DOS MANANCIAIS DE SUPERFÍCIE

Desde os tempos mais remotos, os rios desempenham um papel vital para o bem ou para o mal da humanidade. Há centenas de séculos o homem pré-histórico muito sabiamente estabeleceu-se próximo às margens dos rios. A água matava a sede e permitia que criasse animais e plantasse cereais e legumes. Outras vezes, a enchente dos rios causava destruição e morte.

O volume máximo teoricamente possível de ser extraído de um rio é a sua vazão média de longo período. Entretanto, por razões de ordem econômica, esse potencial se reduz, na prática, para cerca de 70% da vazão total média dos rios.

Os valores apresentados na Tabela 2 mostram que, em termos da relação demandas totais e descargas médias totais dos rios da Terra, os índices variam entre 2 e 21%, segundo os blocos continentais. Em termos globais, a Terra dispõe de recursos de água doce nos rios suficientes para abastecer uma população da ordem de 25 bilhões de pessoas. Não obstante, atualmente, cerca de 50% da população mundial não tem acesso a uma água realmente potável, e da ordem de 75% não dispõem de serviços sanitários. No contexto dos países desenvolvidos dois terços já enfrentam problemas de escassez relativa de água.

É um paradoxo que decorre de duas situações principais:

- 1) Apesar de termos recursos de água relativamente inesgotáveis, estes nem sempre estão lá onde se fazem necessários.
- 2) A alarmante problemática causada pelo modo como os complexos urbano-industriais e atividades agrícolas estão gastando e/ou deteriorando a qualidade da água disponível, numa proporção jamais imaginada no passado.

Tabela 2: Relação demandas/descargas totais (ano 2000)

Regiões	Valores (KM3/ano)			Índice %	
	Descargas	Demandas			
Europa	2.321	(158)	404	(7)	17
Ásia	10.485	(1.433)	2.160	(14)	21
África	3.808	(201)	289	(5)	7
América do Norte	6.945	(434)	946	(6)	14
América do Sul	10.377	(165)	293	(2)	3
Austrália/Oceânia	2.011	(22.5)	35	(1)	2
Com. Estados Ind.	CBH. 350	(286)	533	(6)	12
Total Mundial	40.673	(2.699)	4.660	(7)	11

Fonte: World Resources Institute p 167, 1990
Nota: (.) significa uso consuntivo

Modernamente, aos efeitos destruidores das enchentes nas áreas mais densamente povoadas, vem se somar a deterioração da qualidade das águas dos rios, devido ao lançamento de esgotos domésticos e/ou efluentes industriais, disposição inadequada de resíduos sólidos no meio ambiente, atividades de mineração, chuvas ácidas engendradas pela poluição atmosférica e as contaminações oriundas do uso excessivo de agroquímicos no meio rural, dentre outros fatores.

No Brasil, os índices demandas/disponibilidades de água dos rios, estimados para 1990, situam-se entre 0,03 e 0,00% nos Estados da Região Norte, entre 0,30 e 17% na Região Nordeste, entre 2 e 10% na Região Sudeste, entre 1 e 4% na Região Sul, e entre 0,02 e 7% nos Estados da Região Centro-Oeste (DNAEE, 1984). No Estado de São Paulo o índice é de 10%. Porém, nas áreas mais densamente povoadas, tais como Alto Tietê, Pardo/Rio Grande e bacia do Piracicaba, o Plano Estadual de Recursos Hídricos estima que o índice demandas/disponibilidades poderá superar os 100%, implicando na reutilização intensiva da água (DAEE, 1990). Por outro lado, o tratamento de esgotos restringe-se a 10% da carga poluidora, constituindo-se em um dos maiores obstáculos à efetiva recuperação da qualidade das águas superficiais interiores do Estado de São Paulo. Os Índices de Qualidade das Águas (IQA), mostram que a extensão dos trechos de rios com água imprópria para tratamento convencional, cresceu de 799 km para 1.148 km, no período de 1985-87, CETESB (1988). Em termos nacionais, o índice demandas/disponibilidades é da ordem de 1%. Contudo, o tratamento de esgotos restringe-se a menos de 10% da carga poluidora, constituindo-se em um dos maiores fatores de deterioração das águas dos nossos rios, DNAEE (1984).

O cotejo dessas situações de qualidade e quantidade das águas dos rios a nível do Estado de São Paulo constitui um alerta e mostra, claramente, que as perspectivas futuras são sombrias e preocupantes, caso não sejam tomadas medidas efetivas de gerenciamento integrado dos nossos recursos hídricos. Isto implica num redirecionamento do modelo de abastecimento, o qual se apóia preferencialmente na captação e tratamento da água dos rios e, de modo especial, das tendências de crescimento urbano-industrial na maioria absoluta dos Estados brasileiros.

A QUESTÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

Deve-se considerar que uma parcela do deflúvio total de um rio é formada pelas águas que correm céleres e barrentas pela superfície do solo, engendrando as enchentes. Outra parcela é formada pelo fluxo das águas subterrâneas.

Tendo em vista que a captação de mananciais muito distantes, assim como o tratamento de águas de qualidade excessivamente degradada, ou o reuso, apresentam crescentes limitações técnicas e econômicas, a utilização das águas subterrâneas constitui a alternativa técnico-econômica mais promissora.

Fora do Polígono das Secas, os recursos explotáveis dos aquíferos podem atender as demandas de 70-80% dos núcleos urbanos, por meio de dois a cinco poços. Nos centros urbanos de maior porte as águas subterrâneas constituem importante fonte complementar e/ou estratégica dos sistemas de distribuição alimentados a partir da captação de rios (Rebouças, 1988).

CARACTERÍSTICAS DO MANANCIAL SUBTERRÂNEO

Água subterrânea é a água que encontramos no subsolo quando cavamos um buraco, uma cacimba ou um poço, por exemplo. Na maioria dos casos mais favoráveis, as águas subterrâneas enchem os poros dos materiais rochosos granulares, tais como areias, arenitos, ou secundariamente, as rachaduras das rochas compactas, tais como granitos, calcários, basaltos. Todos esses vazios tem, em geral, dimensões milimétricas, porém, são em tão grande número que 97% do volume de água doce disponível nos continentes, a exceção das calotas polares e geleiras, se encontra no subsolo. Quando a rocha tem muitos poros ou rachaduras interligadas e a maioria é suficientemente grande para deixar

a água infiltrar e mover-se facilmente através, diz-se que a rocha é **aquífera**.

As camadas aquíferas podem ter apenas poucos metros de espessura, ou dezenas e até centenas de metros. Podem constituir os terrenos da superfície, ou ocorrerem a dezenas ou a centenas e mesmo milhares de metros de profundidade, confinadas entre horizontes relativamente menos permeáveis. Podem estender-se por poucos hectares ou por milhares e até milhões de quilômetros quadrados. Podem estar naturalmente saturadas sobre toda a espessura ou se apresentarem em condições de receber grandes volumes de água por meio de recarga artificial.

A quase totalidade das águas subterrâneas normalmente utilizadas pelo homem para consumo, ou para desenvolvimento de suas atividades, tem origem meteórica, isto é, são formadas pelas infiltrações no subsolo de águas de chuva, gelo neve, neblina. Estas águas se encontram, em geral, à profundidades inferiores a 1000 metros. Por fazerem parte do gigantesco mecanismo de circulação das águas do planeta, o **ciclo hidrológico**, tem a característica especial de recurso natural renovável.

As fontes ou nascentes naturais, os fluxos dos rios durante os períodos de estiagem, lagos e lagoas, são alimentados pelas descargas naturais das águas subterrâneas.

Pelo fato de ocorrerem a uma certa profundidade abaixo da superfície do solo, as águas subterrâneas tem na potabilidade a sua principal característica e constituem, geralmente, uma fonte mais segura para obtenção de água de consumo do que os rios e outros mananciais de superfície. Mas, as águas subterrâneas podem ser contaminadas por bactérias patogênicas, as quais tem afligido a humanidade desde os tempos pré-históricos. A adoção de perímetros de proteção sanitária das captações de água subterrânea data dos primórdios das civilizações Indu-chinesa, Egípcia e Greco-romana, porém a sua utilização ainda é pouco praticada no Brasil.

A partir da revolução industrial no século 19, a poluição química, embora nem sempre identificada como tal, tornou-se, igualmente, um problema muito sério. Atualmente, um verdadeiro ciclo de poluição atinge a atmosfera, as águas de superfície, o solo e o subsolo, ameaçando a qualidade do meio ambiente em geral e das águas subterrâneas em particular. Estes problemas se tornam mais graves em relação às águas subterrâneas, na medida em que os processos hidro-geoquímicos são invisíveis e muito complexos, ou pouco conhecidos. Ademais, os meios materiais e, sobretudo, de recursos humanos, para detecção dos

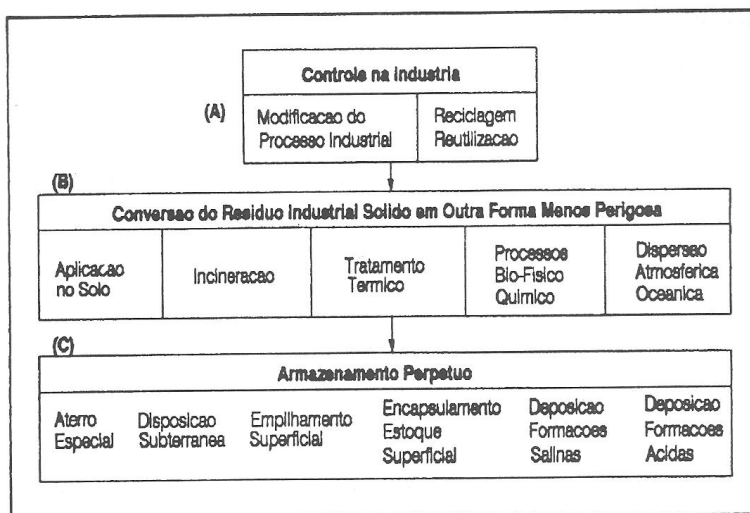


Figura 1 - Hierarquias das práticas de disposição de resíduos industriais perigosos

contaminantes químicos ainda são relativamente limitados, até mesmo nos países desenvolvidos. Vale salientar que, na maioria absoluta das regiões subdesenvolvidas, aos problemas de origem sanitária vem se somar aqueles engendrados pelos contaminantes químicos.

Por outro lado, enquanto a contaminação de um manancial de superfície constitui, em geral, um problema agudo e visível- identificável pela mudança da cor da água, presença de espuma, aparecimento de peixe morto, etc., a contaminação dos aquíferos é invisível e pode transformar-se num problema crônico, na medida em que só venha a ser identificado por meio dos seus efeitos na saúde pública.

A situação hoje já é evidentemente grave e as perspectivas para o futuro são ainda mais preocupantes, na medida em que prossegue a importação de processos industriais altamente gravosos em termos ambientais. A hierarquia das práticas de disposição de resíduos industriais (Fig. 1), bem ilustra esta situação. Com efeito, sob a pressão dos ambientalistas dos países desenvolvidos, as indústrias migram buscando condições de viabilidade ou de maiores lucros mediante as práticas de disposição de resíduos nos níveis B e C.

No Brasil ainda predomina o enterramento perpétuo e o que é mais grave, sem se atentar para os critérios hidrogeológicos fundamentais à proteção das águas subter-

râneas. Ademais, passa a ocorrer, internamente, o extravasamento da urbanização e industrialização, levando para o interior dos Estados os mesmos males hoje evidentes nas suas áreas metropolitanas.

Em termos ambientais deve-se considerar, ainda, que, enquanto o vapor de água da atmosfera renova-se a cada semana, as águas dos rios a cada doze dias, as águas do subsolo podem levar desde dezenas até milhares de anos. Isto significa que, quando as águas subterrâneas são degradadas, os efeitos podem se tornar praticamente irreversíveis.

O SISTEMA DE FLUXOS SUBTERRÂNEOS

Para se entender as formas como as águas subterrâneas interagem com o meio ambiente em geral, e com os outros tipos de águas que participam do ciclo hidrológico, é necessário conhecer os princípios básicos da ocorrência e fluxo das águas no subsolo. Em particular, é importante considerar que a compartimentação do meio geológico em diferentes categorias ou sistemas, tais como meios permeáveis ou aquíferos, pouco permeáveis ou aquitardes e impermeáveis ou aquícludes é artificial, pois a água move-se através, dependendo dos potenciais hidráulicos em jogo e do tempo. Por exemplo, uma camada praticamente impermeável ($K = E-7$ m/s) com 1 KM^2 de área e sob a influência de um gradiente hidráulico de 10%, deixa passar cerca de 0,3 milhões de m^3 /ano de água. Da mesma forma, a lixiviação pela chuva de resíduos industriais dispostos na superfície do terreno, ou de agroquímicos poderá causar a contaminação da água do solo, a qual, por sua vez, poderá contaminar as águas subterrâneas e, estas, fluindo lentamente, irão desaguar nos rios, lagos, contaminando-os. Esta poluição poderá afetar elementos da flora e da fauna, inclusive o homem, através do contato direto, ingestão ou por meio da cadeia alimentar. O aspecto cultural interfere no processo, na medida em que a fonte de poluição poderá decorrer da forma caótica de uso e ocupação do meio físico, em particular dos tipos e/ou das práticas de disposição dos resíduos gerados

pela comunidade em questão. O atavismo cultural-religioso faz com que a prática de sepultamento dos resíduos seja aceita com facilidade. A atitude dominante ainda é de "fora da vista fora da preocupação".

COMPORTAMENTO DOS CONTAMINANTES NO SUBSOLO

As alterações na qualidade das águas subterrâneas são ditas diretas quando engendradas por substâncias naturais ou artificiais introduzidas pelo homem no ciclo geoquímico da terra. Influências indiretas podem ser consideradas como sendo aquelas alterações da qualidade, as quais ocorrem sem adição de substâncias geradas pelo homem ou são produzidas pela interferência nos processos químicos, biológicos, físicos e hidrológicos

Quando essa degradação física, química ou bacteriológica ultrapassa os limites máximos permitidos pelos padrões de potabilidade, isto é, tornando-a imprópria para consumo, diz-se que houve contaminação. Quando a degradação fica abaixo desse limites, diz-se que há poluição Zaporozec (1981). Quando a água natural já apresenta constituintes excedendo os limites de potabilidade, a contaminação será caracterizada pelo aumento nas concentrações destes elementos específicos, Mathess (1982).

Analogamente, considera-se que toda atividade humana poderá efetuar, em maior ou menor grau, o meio ambiente, porém o impacto ambiental só se caracteriza quando este efeito torna o ambiente impróprio ao desenvolvimento da vida em geral, e insalubre ao homem. Assim, o efeito ambiental corresponde ao estágio de poluição das águas, enquanto o impacto ambiental equivale ao nível de contaminação.

É importante reconhecer que há mecanismos naturais no subsolo que podem mitigar os efeitos da fonte de poluição. Dentre os mecanismos mitigadores que atuam no subsolo, o papel dos microorganismos é, certamente, o mais importante.

Considerando que todo processo antropogênico capaz de poluir ou contaminar as águas subterrâneas tem origem na superfície do solo, o papel da zona não saturada assume especial importância. Ademais, é através da zona não saturada que se realizam as interações do meio aquífero com o contexto ambiental natural e as formas de uso e ocupação do meio físico.

Os principais processos geoquímicos, físicos e biológicos que determinam o comportamento dos contaminantes no solo e subsolo são:

Processos geoquímicos: solução- precipitação
oxidação-redução
complexação
adsorção-absorção
trocas iônicas
propriedades coloidais
interações rocha/água
hidrólise

Processos físicos: advecção- dispersão
filtração
evaporação
decaimento radiativo
transporte de gases

Processos biológicos: decomposição de matéria orgânica
transpiração
atividade bacteriana
biodegradação-biotransformação
bioacumulação

Uma visão esquemática da intensidade relativa destes processos é apresentada na Fig. 2, Golwer, (1983)

A abordagem torna-se, necessariamente, interdisciplinar e sistêmica. Neste particular, a hidrogeologia deverá evoluir da consideração clássica de locação e construção de uma obra de captação (poço, galeria, dreno, etc), para uma visão mais ampla que considera o sistema aquífero, ou ainda mais propriamente, o sistema de fluxos subterrâneos, o qual abrange aquíferos, aquíardes e aquícludes, zona não saturada e saturada, componentes bióticos, abióticos e fatores antropogênico-sócio-culturais.

A classificação dos aquíferos em livre e confinado, ou semi-livre e semi-confinado, realizada com base em comportamentos hidráulicos, tem os seus ambientes correspondentes em termos geoquímicos, conforme mostra a Fig.3.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Dois fatores tornam a água um recurso natural singular: primeiro é que ela é essencial à sobrevivência humana; o segundo é que, ao contrário de outros recursos naturais, o total de água no mundo é constante e não pode ser incrementado (como madeira), nem diminuído (como petróleo).

Outra característica importante da água é que a sua distribuição, no espaço e no tempo, nem sempre é compatível com as necessidades das populações, apesar de ser essencial à saúde, agricultura e indústria. Isto faz com que o seu controle seja uma questão de governo desde a antiguidade.

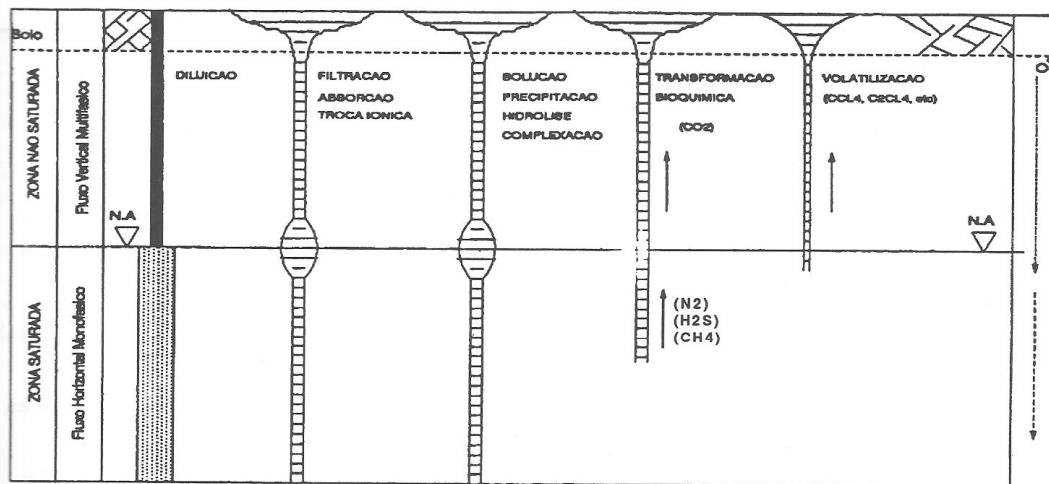


Figura 2 - Processos atuantes na atenuação da poluição nas águas subterrâneas (Golwer, 1983)

A escassez relativa e acelerada deterioração da qualidade dos mananciais de superfície, está fazendo com que se utilize de forma crescente as águas subterrâneas. Aliás, estas são cerca de 3 mil vezes mais abundantes que a água de superfície, geralmente mais limpas e melhor protegidas contra os agentes contaminantes.

Os impactos ambientais engendrados pela forma caótica de uso e ocupação do solo no meio urbano, afeta as águas subterrâneas, na medida em que reduz as recargas, gera superextração e induz poluição a partir de variadas fontes, tais como: vazamento de tanques de combustíveis, acidentes de transporte de produtos industriais perigosos, disposição de resíduos domésticos e industriais.

A água subterrânea tem uma grande importância para a agricultura, principalmente para irrigação. Desde que cuidadosamente planejada e gerenciada, a irrigação pode proporcionar um grande aumento de produtividade. Porém, esta agricultura intensiva, geralmente baseada no uso de fertilizantes e produtos químicos para proteger a cultura, é uma das causas principais de contaminação das águas subterrâneas por nitratos e pesticidas.

Apesar da indústria utilizar muito menos água do que a agricultura, seu potencial poluidor é muito maior. Da água utilizada, mais de 80% retorna à fonte, freqüentemente poluída por elementos do processo de industrialização. Os segmentos industriais mais potencialmente poluidores são papel e celulose, química e petroquímica, petróleo, metalurgia, alimentos, têxtil e mineração.

Poluentes como metais pesados ou compostos orgânicos atingem as águas subterrâneas, através de descargas e/ou vazamentos de efluentes, ou indiretamente, pelo retorno de poluentes atmosféricos, lixiviação de pilhas de resíduos e/ou de matérias prima.

Os governos precisam adotar e fazer cumprir regulamentações necessárias à proteção das águas subterrâneas. Ao mesmo tempo, uma política de preços desses recursos terá que ser estabelecida, pois isto incentivará a sociedade em geral e as indústrias e agricultura a economizá-los e protegê-los. A sociedade tem que se conscientizar da necessidade de conservação das águas subterrâneas como um recurso de importância vital.

Ressalta-se a necessidade de compreensão de que os processos do ciclo hidrológico são indissociáveis do ciclo da vida na litosfera e hidrosfera e da manutenção de um ambiente saudável à vida do homem em particular.

REFERÊNCIAS

- DAEE- Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo (1990): Plano Estadual de Recursos Hídricos, pp 18- 24.
- DNAEE- Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica (1985): Plano Nacional de Recursos Hídricos- Doc. Preliminar, Brasília, DF.
- CETESB- Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (1988): Qualidade das águas no Estado de

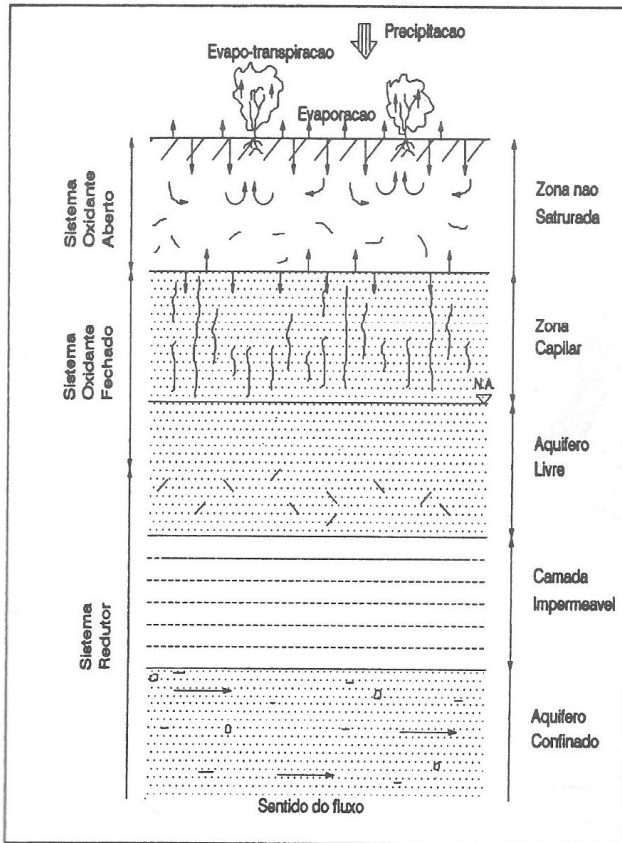


Figura 3 - Tipos de Aquíferos e Ambientes Geoquímicos (Alford, L. 1981)

São Paulo. Rev. Águas e Energia Elétrica, ano 5 n 14, pp 14-22.

GOLWER, A. (1983): Underground purification capacity- Groundwater in Water Resources Planning, Int. Assoc. Hydrol. Sci., Publ. 142, vol 2, pp 1063-1072 UNESCO.

MATHESS, G. (1982): The properties of groundwater. 406 p (John Wiley & Sons).

PEIXOTO, J., P., & Oort, A., H. (1990): Le cycle de l'eau et le climat, La Recherche n 221, v 21, pp 570-579, Paris.

REBOUÇAS, A., C. (1988): Groundwater in Brazil. Episodes, n 3, v 11, pp 209-213.

REBOUÇAS, A., C. (1991): Poluição das águas no Brasil, Saneamento Ambiental, n 15, pp 14-21.

World Resources Institute (1990): World Resources 1990-91, chap. 10, pp 167, Oxford Press..

ZAPOROZEC, A. (1981): Groundwater pollution and its sources, Geojournal, 5, pp 454-471.