

## **O USO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS NA RECARGA DE AQUÍFEROS**

Ricardo Hirata (1)

Ingo Wahnfried (2)

Instituto de Geociências

Universidade de São Paulo

(1) rhirata@usp.br; (2) iwahn@yahoo.com

### **INTRODUÇÃO**

As águas subterrâneas desempenham um papel importante e algumas vezes fundamental no abastecimento público e privado de mais de 250 milhões de pessoas em todo o continente latino-americano. No Brasil, embora as estatísticas sejam incompletas, acredita-se que 35-45% de toda a população faça uso deste recurso. Mesmo em cidades onde os aquíferos têm produção bastante limitada, como as da Bacia do Alto Tietê (São Paulo), 8 m<sup>3</sup>/s são extraídos de mais de 9.000 poços em atividades, cobrindo o déficit do sistema público (Hirata et al 2002). No Estado de São Paulo, 74% de todos os núcleos urbanos são total ou parcialmente abastecidos por fontes subterrâneas.

Esta importância, entretanto, não é acompanhada pela atenção que os órgãos de controle ambiental e de gestão do recurso deveriam desempenhar para a sua proteção e uso racional. Poucos são os estados brasileiros que contam com alguma prática efetiva para um correto manejo dos recursos hídricos subterrâneos. Na maioria dos casos, a intervenção das instituições gestoras e controladoras do recurso hídrico somente ocorre quando o problema atinge níveis insustentáveis.

Muito embora os aquíferos, mesmo em grandes centros urbanos e industriais, apresentem boa qualidade natural, já são relatados vários casos de contaminação de solos e das águas subterrâneas mais superficiais. De forma mais restrita, algumas áreas urbanas apresentam problemas de exploração inadequada, configurando a superexploração dos aquíferos.

Se de um lado o grande crescimento urbano em países latino-americanos tem exigido demandas cada vez maiores de água, de outro, tem havido proporcionalmente uma grande geração de águas residuárias, que muitas vezes não são tratadas e nem lançadas adequadamente. Efluentes domésticos em tanques sépticos e fossas negras têm sido um dos grandes causadores de contaminação de aquíferos freáticos por nitrato e microorganismos patogênicos. Águas de processos industriais têm impactado os aquíferos com vários compostos de alta toxicidade (Tabela 1).

Tabela 1. Atividades antrópicas mais comuns no Brasil, potencialmente geradoras de carga contaminante ao aquífero (Foster & Hirata 1988)

ATIVIDADES	CARACTERÍSTICA DA CARGA CONTAMINANTE			
	distribuição	principal contaminante	sobrecarga hidráulica	ausência de camada de solo
<b>URBANA</b>				
Saneamento "in situ"	u/r P-D	n f o	+	*
Vazamento de esgotos (a)	u P-L	o f n	+	*
Lagoas de oxidação	u/r P	o f n	++	*
Aplicação de águas residuais em superfície (a)	u/r P-D	n s o f	+	
Rios e canais de recepção (a)	u/r P-L	n o f	++	*
Lixiviados de lixões/aterros sanitários	u/r P	o s h		*
Tanques de combustível	u/r P-D	o		*
Drenos de rodovias	u/r P-D	s o	+	*
<b>INDÚSTRIA</b>				
Vazamento de tanques/tubos (b)	u P-D	o h		*
Derramamento accidental	u P-D	o h	+	
Lagoas de efluentes	u p	o h s	++	*
Lançamento de efluentes em superfície	u P-D	o h s	+	
Canais e rios receptores	u P-L	o h s	++	*
Lixiviado de resíduos sólidos	u/r P	o h s		*
Drenos de pátios	u/r P	o h	++	*
Material em suspensão e gases	u/r D	s o		
<b>AGRÍCOLA (c)</b>				
a- 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		
- com irrigação de águas residuais	r D	n o s f	+	
b- Beneficiamento/criação de gado e animais				
- lagoas de efluentes sem revestimentos	r P	f o n	++	*

Continuação...

ATIVIDADES	CARACTERÍSTICA DA CARGA CONTAMINANTE			
	distribuição	principal contaminante	sobrecarga hidráulica	ausência de camada de solo
- lançamento em superfície	r P-D	n s o f		
- canais e rios receptores de efluentes	r P-L	o n f	++	*
<b>EXTRAÇÃO MINERAL</b>				
Desmonte hidráulico	r/u P-D	s h		*
Descarga de água de drenagem	r/u P-D	h s	++	*
Lagoas de decantação	r/u P	h s	+	*
Lixiviado de resíduos sólidos	r/u P	s h		*

- (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/R Pontual/linear/difuso/regional  
 n Nutrientes f Patógenos fecais o Compostos orgânicos sintéticos e/ou carga orgânica  
 s Salinidade m Metais pesados

Este quadro de excesso e falta de água tem feito com que vários países lancem mão de recargas artificiais de aquíferos com águas residuárias (Foster *et al* 1994). No Brasil a recarga artificial de aquíferos não é uma prática conhecida. O que ocorre é a instalação de atividades que devido ao seu desenho e/ou operação acabam gerando recargas induzidas não-intencionais ou mesmo acidentais. Exemplo disso são a irrigação excessiva de áreas agrícolas, as lagoas de efluentes sem impermeabilização, as fossas sépticas e negras, entre outras.

A demanda cada vez maior de água subterrânea e a necessidade do tratamento de águas residuárias a baixo custo têm levado pesquisadores e técnicos a avaliarem a recarga de aquíferos com efluentes como uma das alternativas em países como o Brasil.

## Métodos de recarga de aquíferos

Entende-se recarga, as águas que, provenientes do excesso do balanço hídrico natural ou de atividades antrópicas (Tabela 1), chegam até o reservatório subterrâneo, ou seja, o aquífero. Desta forma é possível

classificar as formas de recarga artificial em três tipos: a) intencional, quando a atividade ou a prática foi desenhada para gerar a recarga; b) acidental, quando a recarga ocorre por um mau funcionamento de desenho, construção ou operação da atividade; e c) incidental, quando a atividade tem em seu desenho características que promovam a recarga, mas esta não foi planejada como tal (Tabela 2).

Tabela 2: Métodos de recarga de aquíferos com uso de águas residuárias (Foster et al. 1994)

	Instalação/Processo	Objetivo Primário	Nível de tratamento		Recarga água subterrânea
			Comum	Requerido	
Com rede de esgoto	Tanques de estabilização / oxidação	tratar	P	P, S	inc, ac
	Tanque/fossa/vala de infiltração	dispor; às vezes usar ou tratar	P, S	P, S	int, inc
	Drenagem de infiltração		S	S	int, inc
	Espalhamento sobre a terra		N, P	P, S	inc
	Irrigação agrícola ou recreio	usar	N, P	S, T	inc, ac
	Filtração em leito de rio contamin.	nenhum	N, P, S	-	ac
	Lixiviado de esgoto doméstico	nenhum	N	-	ac
	Poços profundos de injeção	dispor	S, T	T	int*
Sem rede de esgoto	Tanque séptico com sumidouro	dispor	P, S	S	inc
	Fossa séptica	dispor	N	N	inc
	Latrinas	dispor	N	N	inc
	Descarga em poços abandonados	dispor	N	-	ac, inc

N: *in natura*, P: primário, S: secundário, T: terciário

inc: incidental, int: intensional, ac: accidental

\*Não em aquíferos de água doce

No Brasil as recargas artificiais não incidentais e accidentais são as práticas mais comuns. Como exemplo, têm-se as perdas das redes de água potável e de esgoto das cidades. Na Bacia do Alto Tietê (São Paulo), as fugas da rede de água totalizam mais de 15 m<sup>3</sup>/s, garantindo o balanço da

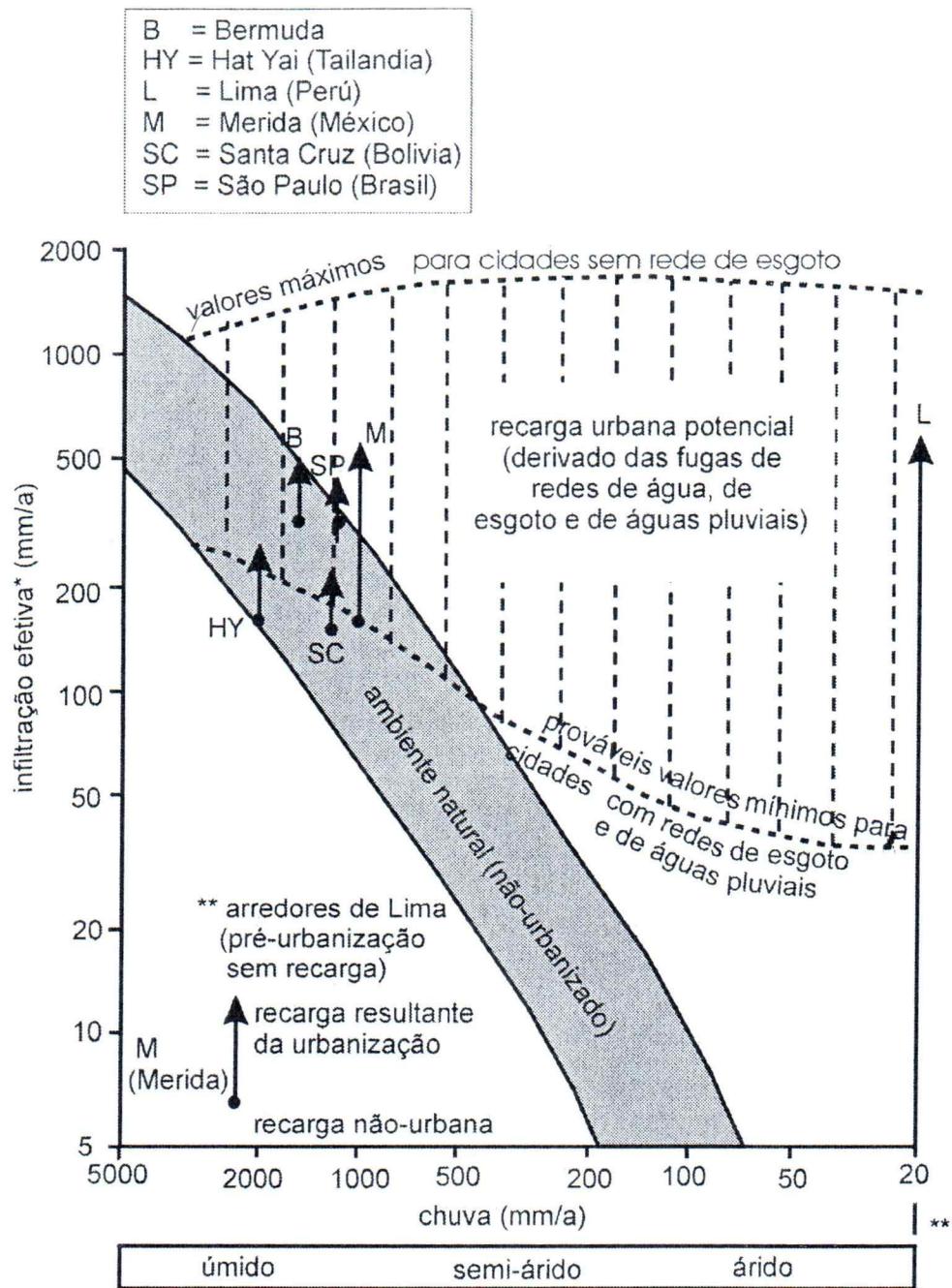
exploração, que somam 8,9 m<sup>3</sup>/s (dados de 2000). É interessante notar que embora a urbanização cause a impermeabilização do terreno, há sempre um aumento na recarga (Figura 1). Obviamente as taxas de recarga serão maiores se a área, ademais das perdas da rede de distribuição de água, não contar com uma rede de esgoto e fizer injeção por fossas sépticas ou negras (Varnier & Hirata 2002). As áreas agrícolas sob irrigação são outra importante fonte de recarga ao aquífero. No Estado de São Paulo, devido ao tipo de agricultura altamente tecnificada, a irrigação é prática comum, embora não usada como recarga intencional de aquífero (Figura 2).

Várias são as obras ou atividades que são utilizadas para a recarga de aquíferos. As mais comuns são: tanques e lagoas; drenos de infiltração; áreas agrícolas irrigadas; e poços de injeção.

Os **tanques e lagoas** são o método mais comum de infiltração de águas residuárias. Esta técnica consiste em uma sequência de lagoas que são usadas ciclicamente a fim de permitir uma melhor taxa de infiltração. Normalmente para uma área de infiltração se requerem outras duas ou três para um manejo adequado. As taxas de infiltração mais comuns, baseadas em experiências norte-americanas e européias, estão entre valores de 100 e 160 m/a (Tabela 3). Uma variação desta técnica é a wetland, que são áreas alagadas com plantas específicas e utilizadas para tratamento de efluentes (Santos et al 2002).

Os **drenos de infiltração** são escavações lineares ou radiais que permitem a recarga de aquíferos. Devido ao seu sistema construtivo, exige-se água com menor conteúdo de matéria em suspensão comparativamente às lagoas. Normalmente são usados em sistemas de menor porte.

O uso de efluentes domésticos ou industriais para a **irrigação de áreas agrícolas ou áreas vegetadas** sem fim agrícola é uma outra prática que promove o tratamento dos líquidos e a recarga de aquífero. A distribuição dos líquidos pode ser através de sulcos escavados dentro da parcela, de inundação da área cultivada, ou de aspersão. Tanques ou pequenos terraços dentro da área podem promover uma maior retenção dos efluentes, sobretudo em terrenos de pendentes elevadas. Um exemplo bastante conhecido no Brasil é o uso de ferti-irrigação com vinhaça da manufatura do açúcar e álcool a partir da cana. Normalmente as taxas de infiltração são da ordem de 5-20 mm/d.



\* para aquíferos livres ou semi-confinados assume-se que o escoamento superficial se torna mais frequente em situações de fortes chuvas, mas a evapotranspiração freática não é considerada

Figura 1. Recarga associada à urbanização (modificado de Foster *et al.* 1998).

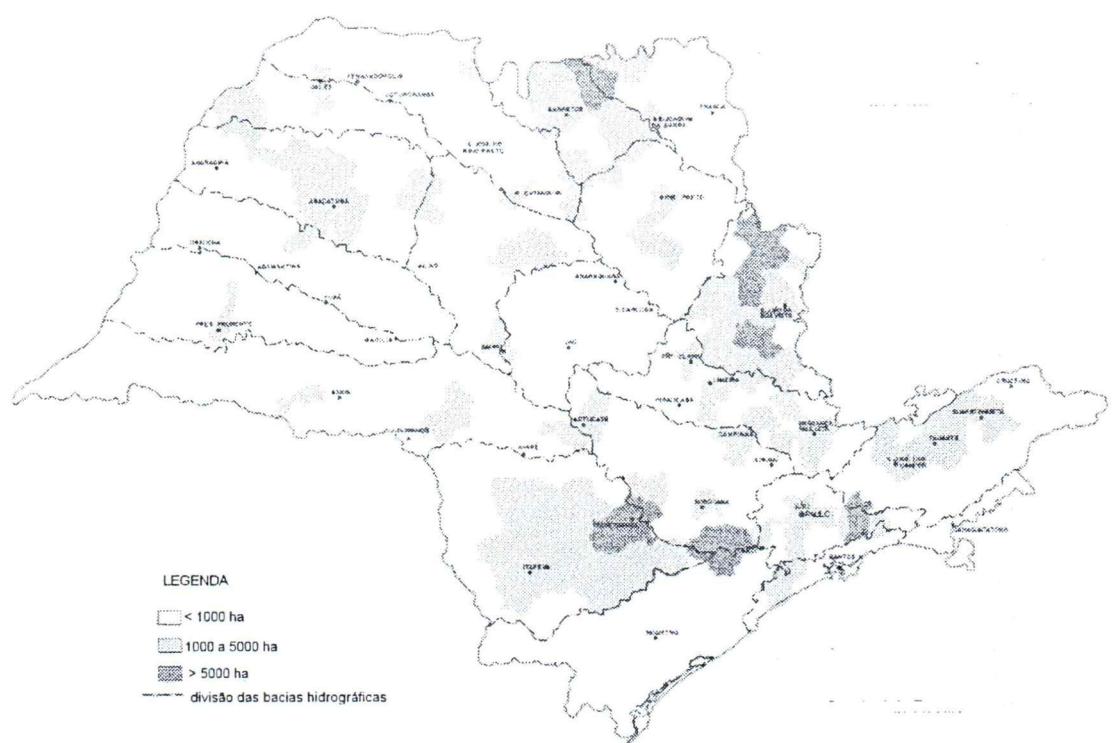


Figura 2. Irrigação no Estado de São Paulo (São Paulo 1990)

**Os poços de injeção** são obras que injetam os efluentes tratados diretamente no aquífero ou também introduzem águas de menor qualidade em aquíferos salgados ou não potáveis. A grande vantagem é que necessitam de pequenas áreas. Entretanto, exigem tratamento avançado e são sujeitos a problemas de colmatação do poço. Devido às características hidráulicas do empreendimento os volumes tratados são reduzidos, comparativamente a outros métodos.

Muitas dessas técnicas de infiltração permitem a recarga de aquíferos com águas residuárias e o tratamento do efluente, sobretudo para contaminantes como microorganismos patogênicos, matéria orgânica e fosfato. Esta eficiência será função das concentrações originais do contaminante do efluente, condições físico-químicas dos líquidos do ambiente na interface solo/aquífero, das características hidráulicas do aquífero, taxa de infiltração e da forma de manejo do empreendimento. A experiência tem mostrado, entretanto, que há necessidade de algum tipo de tratamento (primário, secundário e até terciário) antes da aplicação do efluente no solo.

Tabela 3: Projetos operacionais de recarga de aquíferos com águas resíduárias (Foster et al. 1994).

Localização	Clima	Geologia	Prof. do N.A.	Método de aplicação	Capacidade de infiltração	Tipo de efluente
Flushing Meadow, Arizona, EUA	Semi-árido	Areia siltosa	3m	6 tanques c/ 0,13ha.cada – 9 dias inundado, 12 seco	60-120 m/a	Secundário (mas pode ser usado primário)
Phoenix, Arizona, EUA	Semi-árido	Areia e conglomerado	15m	4 tanques c/ 4 ha.cada – 14 dias inundados, 14 secos	100 m/a	
Whittier Narrows, Los Angeles, EUA	Semi-árido	Areia	3m	Total 279 ha./1,5-8ha. de tanques, com 35% em operação normal	300 m/a	Efluentes secundários desinfetados, misturado com escoamento superficial
Região Dan – Israel	Semi-árido	Dunas de areia	-	4 tanques/total 30ha. 1x3 dias de inundado/2-4 seco	100 - 160 m/a 1,5 – 2,0 m/d	Secundário
Berlin – Alemanha	Temperado	Areia	2-3m	série de 0,13ha. cada um	-	Secundário
Witchurch (Hampshire), GB	Temperado	Rocha carbonática c/ microporos	10-12m	a) 33 estanques c/ 0,02 ha. cada – 50% descansa a cada 2 semanas	0,08 m/d	Primário
				b) rede de drenos de 1ha. (35% utilizado por vez	0,08 – 0,51 m/d	Secundário

III ENCONTRO DE PRESERVAÇÃO DE MANANCIAIS DA ZONA DA MATA MINEIRA

**Continuação...**

Localização	Clima	Geologia	Prof. do N.A.	Método de aplicação	Capacidade de infiltração	Tipo de efluente
Arlesford (Hampshire), GB	Temperado	Rocha carbonática c/ microporos	26 – 35m	rede de drenos de 1ha. (35% utilizado por vez)	0,03 m/d	Secundário
Caddington (Bedford), GB	Temperado	Rocha carbonática c/ microporos	10 – 15m	Rede de drenos	0,22 m/d	Secundário
Winchester (Hampshire), GB	Temperado	Rocha carbonática c/ microporos	4 – 36m	Diques (1,2m de prof. por 2m de largura) ao redor de uma colina	0,03 m/d	Primário
Langar, Alemanha	Temperado	Areia média a grossa	5m	a) diques (38m por 3,2m de profundidade)	2,0m/d	Terciário
				b) vala de injeção	1,3m/d	
Dunas Costeiras, Países Baixos	Temperado	Dunas de areia	-	8 tanques	0,09 m/d	Terciário

## Capacidade de degradação de contaminantes em sistemas de tratamento de águas residuárias

Quanto mais lenta é a infiltração, maior será o tempo para possíveis degradações e adsorções do contaminante. Isso é particularmente sensível para microorganismos patogênicos que têm baixa persistência no aquífero, entretanto não tem nenhuma serventia para soluções altamente salinas. Microorganismos patogênicos: as lagoas são eficientes na remoção de bactérias e protozoários. Vírus podem representar algum risco em poços extraíndo água de áreas próximas ao empreendimento. A sobrevivência de microorganismos está diretamente relacionada ao tempo de percolação da água da lagoa até o aquífero (Tabela 4). Desta forma, a sua eficiência será diretamente associada à sua operação e desenho, que ditará as taxas de entrada de efluentes no sistema.

<b>Organismo</b>	<b>Tempo de sobrevivência (dias)</b>
Coliformes	38
Estreptococos	35 a 63
Estreptococos fecal	26 a 77
Salmonelas	15 a > 280
<i>Salmonela typhi</i>	1 a 120
<i>Tubercle bacilli</i>	> 180
Leptospira	15 a 43
Cistos de entameba histolítica	6 a 8
Enterovírus	8 a 175
Ovos de ascaris	> 7 anos
Larvas Hookworm	42
<i>Brucella abortus</i>	30 a 125
Organismos de febre Q	148

Tabela 4. Sobrevivência de microorganismos em aquíferos (McFeters *et al.* 1974)

**Nitrogênio:** o nitrato, a forma mais oxidada do nitrogênio, é o contaminante mais comum em aquíferos livres. Devido à sua alta mobilidade e persistência têm sido um contaminante bastante problemático na injeção de águas residuárias domésticas. Em muitas lagoas, devido à ausência de oxigênio, é comum também que o aquífero seja contaminado por amônio ( $\text{NH}_4^+$ ). As únicas formas de eliminação do nitrogênio são: a denitrificação

(redução do nitrato aos gases N<sub>2</sub> e N<sub>2</sub>O); a volatilização do NH<sub>3</sub>; ou mesmo consumo de nitrogênio por plantas, como em wetlands (Santos *et al* 2002).

**Metais pesados:** o transporte e o comportamento destes contaminantes estão associados ao ambiente físico-químico do efluente. A mobilidade de metais é função direta do pH e do Eh da solução. Metais podem ser fortemente adsorvidos à argila e à matéria orgânica. Muito embora não haja migração importante de metais abaixo de lagoas, exceto em condições de ambiente muito reduzido ou em pH muito ácido. A adsorção, entretanto, não representa eliminação do problema. O material de fundo deverá ter destinação apropriada, pois é ele um concentrador dos contaminantes.

**Compostos orgânicos e orgânicos sintéticos:** sistemas de lagoas e mesmo a zona não-saturada do aquífero têm grande capacidade de degradação de uma grande parte da matéria orgânica. Há, entretanto, os compostos sintéticos, como os solventes clorados e mesmo alguns hidrocarbonetos de petróleo que apresentam grande persistência no aquífero. Estes compostos têm se tornado uma das maiores preocupações em contaminações de aquíferos (Pankow & Cherry 1996).

**Sais:** devido a sua grande persistência e estabilidade, os sais são uma grande preocupação de processos de recarga com águas residuárias. Somente a diluição com águas de outra origem poderá permitir a redução de impactos ao aquífero. Adicionalmente é importante lembrar que o aquífero tem uma capacidade de diluição bastante alta, mas é notado historicamente que aquíferos próximos a sistemas de recarga apresentam elevação na salinidade.

## Conclusões

As experiências de recarga artificial com águas servidas têm mostrado ser esta uma prática simples e de baixa exigência tecnológica, podendo auxiliar na solução da destinação-tratamento de águas residuárias e recarga de aquíferos. Pesam contra esta prática problemas de contaminação do aquífero e ,quando são utilizadas lagoas, a grande área que estas ocupadam. Valores de 100-160 m/a de efluentes podem ser tratados em lagoas localizadas em terrenos aluvionares sedimentares areno-siltosos.

Qualquer sistema de recarga artificial deve ser precedido de estudos adequados e conhecimento da dinâmica e geoquímica dos aquíferos. Trabalhos em escala piloto servirão para avaliar as capacidades de retenção, degradação e diluição dos contaminantes. No programa de operação do empreendimento, uma rede de monitoramento do aquífero

deverá ser implementada de maneira criteriosa, com coletas e análises frequentes, a fim de reduzir os impactos no recurso hídrico subterrâneo.

**Referências bibliográficas**

- Foster, S.; Gale, I; Hespanhol, I. 1994. Impacto del uso y disposición de las aguas subterráneas en los acuíferos con referencia a América Latina. UK-ODA, British Geological Survey, CEPIS. Lima, Peru. 77pp.
- Foster, S.; Laurence, A.; Morris, B. 1998. Las aguas subterráneas en el desarrollo urbano. Evaluación de las necesidades de gestión y formulación de estrategias. World Bank. Documento Técnico n. 360. Washington, EUA. 61 pp.
- McFeters, G.A., Bissonnette, G.K., Jezeski, J.J., Thomson, C.A., Stuart, D.G. 1974. Comparative survival of indicator bacteria and enteric pathogens in well water. Applied Microbiology., 27: 823-829.
- Pankow, J & Cherry, J. 1996. Dense chlorinated solvents and other DNAPLs in groundwater. Waterloo Press. Waterloo, Canadá. 522pp.
- Varnier, C. & Hirata, R. 2002. Contaminação da água subterrânea por nitrato no Parque Ecológico do Tietê - São Paulo. Revista Águas Subterrâneas. 32 p. 77-80.
- Santos; G.; Hirata, R; Ferrari, L. 2002. Modelagem matemática para a aplicação de sistemas de Wetlands no tratamento de aquíferos livres e rasos contaminados. International Association of Hydrogeologists Congress. Mar del Plata (Argentina). IAH.
- São Paulo. 1990. Plano Estadual de Recursos Hídricos: Primeiro Plano do Estado de São Paulo. Síntese. São Paulo, DAEE. 97p.

***RICARDO HIRATA***

Ricardo Hirata é geólogo formado pela UNESP e professor do IGc-USP. Desenvolveu o seu *doutorado* e *mestrado* na USP e *Pós-Doutoramento* na University of Waterloo (Canadá). É consultor da International Atomic Energy Agency (IAEA) e Membro Assessor em Águas Subterrâneas do World Bank (GW-Mate). Foi Hidrogeólogo Sênior do Instituto Geológico (São Paulo), Professor Visitante na Universidad de Costa Rica, Hidrogeólogo Residente do CEPIS-Organização Mundial da Saúde (Peru) e Hidrogeoquímico Chefe do Departamento de Águas e Energia Elétrica (São Paulo). Atuou também como consultor da Organização Pan Americana da Saúde (OPAS/OMS). Com 19 anos de experiência tem trabalhado intensivamente com recursos hídricos e águas subterrâneas no Brasil e em mais de 18 países, inclusive ministrando cursos profissionais. Desde 1984, tem vários trabalhos publicados em hidrogeologia, incluindo manuais de referências para a OPAS/OMS, Banco Mundial e UNESCO.