

# RECARGA ARTIFICIAL DE AQÜÍFEROS

Por IVANILDO HESPANHOL (ESCOLA POLITÉCNICA - USP)

**RESUMO:** A prática de recarga artificial de aquíferos com efluentes domésticos tratados, embora já esteja consolidada internacionalmente é, ainda, pouco conhecida no Brasil. Entretanto, quando estiver adequadamente regulamentada e praticada, trará benefícios, introduzindo uma nova dimensão para a disposição de efluentes domésticos, proporcionando, simultaneamente, aumento da disponibilidade de água, proteção de aquíferos costeiros contra salinização, controle de subsidência de solos e sustentação dos níveis de aquíferos freáticos submetidos a condições inadequadas de demanda.

A recarga artificial pode ser efetuada diretamente através de poços de injeção ou por sistemas de infiltração. Os métodos de infiltração são mais econômicos e permitem utilizar a capacidade de remover poluentes da camada insaturada e do próprio aquífero, estabelecendo as condições para projeto dos sistemas de tratamento e percolação designados por tratamento solo-aquífero ou TSA.

Esses sistemas proporcionam níveis de tratamento elevados em termos de compostos orgânicos (remoção de DBO, DQO, CODT), organismos patogênicos (coliformes fecais, criptosporídeos, giardia e vírus) e compostos inorgânicos (nitrogênio e metais pesados), a custos bastante inferiores aos associados a tratamento avançados convencionais, construídos na superfície.

## 1. Introdução

A prática de recarga artificial de aquíferos com efluentes domésticos tratados vem encontrando aplicação em diversas partes do mundo, tanto em regiões áridas e semi-áridas como em áreas com disponibilidade hídrica elevada. No Brasil, a prática, que é ainda pouco conhecida, vem suscitando reações de hidrogeólogos, biólogos, engenheiros ambientais e conservacionistas em geral, que a consideram uma metodologia com grande potencial para contaminar as águas subterrâneas.

A recarga natural de aquíferos subterrâneos se

realiza diretamente, através da precipitação pluviométrica e de run-off, ou através de rios, lagos e reservatórios. A recarga natural é evidentemente efetuada sem qualquer controle ou seleção, podendo vir, também, a poluir os aquíferos subjacentes. A condição mais crítica é, entretanto, quando a recarga é influenciada pela atividade antrópica não planejada ou inconsciente, submetendo os aquíferos a um processo de contaminação por infiltração e/ou lixiviação associada à aplicação, no solo, de efluentes ou biossólidos e de fertilizantes e biocidas. Ocorre, ainda, pela infiltração de micropoluentes orgânicos e



IVANILDO HESPANHOL  
ivanhes@usp.br

Professor titular da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, presidente do Centro Internacional de Referência em Reuso de Água-CIRRA/IRCWR, [www.usp.br/cirra](http://www.usp.br/cirra)

inorgânicos presentes em áreas degradadas, ou de combustíveis e chorume, oriundo de aterros sanitários ou depósitos de lixo a céu aberto.

A engenharia de recursos hídricos desenvolveu, com a finalidade de aumentar a disponibilidade de água e de, eventualmente, resolver problemas localizados, a tecnologia de recarga artificial, utilizando efluentes adequadamente tratados. Essa prática, designada como "recarga gerenciada", permite o aumento das reservas subterrâneas com velocidade muito maior do que as que ocorrem naturalmente, proporcionando, ainda, maior segurança em termos de proteção dos aquíferos, uma vez que a qualidade da água de recarga é adequadamente monitorada.

## 2. Objetivos e vantagens

A recarga artificial, vista como uma modalidade de reuso, pode atender a uma gama significativa de objetivos, entre os quais:

- **proporcionar tratamento adicional de efluentes;**

A infiltração e percolação de efluentes tratados se beneficia da capacidade natural de biodegradação, sorção, hidrólise, precipitação, complexação, troca iônica, filtração, etc. dos solos, proporcionando um tratamento *in situ* e permitindo, em função do tipo de efluente utilizado, dos métodos de recarga, de condições hidrogeológicas e dos usos previstos, eliminar a necessidade de sistemas de tratamento avançados. O sistema de tratamento proporcionado pelo conjunto da camada insaturada e do aquífero propriamente dito é designado por Tratamento Solo-Aquífero, ou TSA.

O processo de recarga contribui, ainda, para a perda de identidade entre efluentes tratados e a água subterrânea, reduzindo o impacto psicológico do reuso para fins benéficos diversos. A recarga artificial permite:

- **aumentar a disponibilidade de água em aquíferos potáveis ou não potáveis;**

Esta é uma das principais vantagens da recarga artificial, particularmente em áreas carentes de recursos hídricos. A transformação de esgotos em água com qualidade para o atendimento de usos benéficos, tais como a irrigação, se constitui, também, em benefício ambiental, evitando a descarga de efluentes em corpos d'água.

- **proporcionar reservatórios de água em substituição a reservatórios superficiais;**

Alguns usos de água, que apresentam demanda sazonal, requerem grandes reservatórios para armazenamento ou métodos alternativos de descarga nos períodos de

baixa demanda. Esses reservatórios, quando construídos na superfície, demandam grandes áreas e estão sempre associados a custos elevados. Além dos impactos ambientais que causam, reservatórios superficiais são afetados por poluição, evaporação, desenvolvimento de gostos e odores devido à proliferação de algas, produção excessiva de macrófitas e outros problemas que implicam custos de operação e manutenção.

- **que o aquífero possa servir como um eventual sistema de distribuição, permitindo eliminar canais ou linhas troncos;**

Dependendo das condições locais, os poços de recuperação da água infiltrada podem ser localizados em diversos pontos críticos de demanda, permitindo redução de custos associados a sistemas de distribuição e de reservatórios de regularização.

- **prevenir subsidência de solos;**

A subsidência de solos, definida como "movimento para baixo ou afundamento do solo causado pela perda de suporte subjacente", constitui problema relevante em áreas onde ocorre excessivo bombeamento de água de aquíferos não suficientemente recarregados naturalmente. A recarga de aquíferos afetados por subsidência elimina ou minimiza o fenômeno da subsidência.

- **prevenir a intrusão de cunha salina em aquíferos costeiros.**

O bombeamento excessivo de água subterrânea de aquíferos adjacentes a áreas costeiras pode provocar a intrusão de água salina, tornando-os inadequados como fontes de água potável ou para outros usos que não toleram salinidade elevada. Baterias de poços de injeção, ou bacias de infiltração, podem ser construídos em áreas críticas, criando barreiras para evitar a intrusão salina.

Efluentes tratados são injetados nos aquíferos confinados, estabelecendo um gradiente hidráulico no sentido do mar, que previne a penetração de água salgada no aquífero.

## 3. Técnicas de recarga artificial

Há dois métodos básicos para se processar a recarga de aquíferos:

- **Injeção direta através de poços**

A recarga por meio de injeção direta requer a construção de poços projetados especificamente para esta finalidade, estendendo-se através da camada insaturada até o aquífero. Os efluentes recuperados são injetados diretamente, sob pressão, geralmente em aquíferos profundos e bem confinados. A injeção direta é a mais adequada quando os aquíferos são muito profundos ou quando a topografia local ou a disponibilidade de área torna a técnica de infiltração impraticável ou excessivamente custosa.

Essa metodologia tem sido empregada com êxito para a proteção de aquíferos costeiros visando evitar a intrusão de água salgada. Há uma grande experiência internacional sobre a proteção de salinização de aquíferos costeiros, podendo ser salientados os que operam na região de Los Angeles (Coastal Barrier Project, Orange County Sanitation District), em El Paso, Texas (Fred Harvey Water Reclamation and Groundwater Recharge Project) e no Sultanato de Omã (Muskat e Salalah).

Os custos envolvidos na injeção direta são significativamente elevados tanto no que se refere à construção de poços como em relação aos níveis de tratamento necessários para a proteção da qualidade de água do aquífero.

- **Sistemas de infiltração superficial**

Ocorrendo condições locais e características hidrogeológicas favoráveis, a recarga

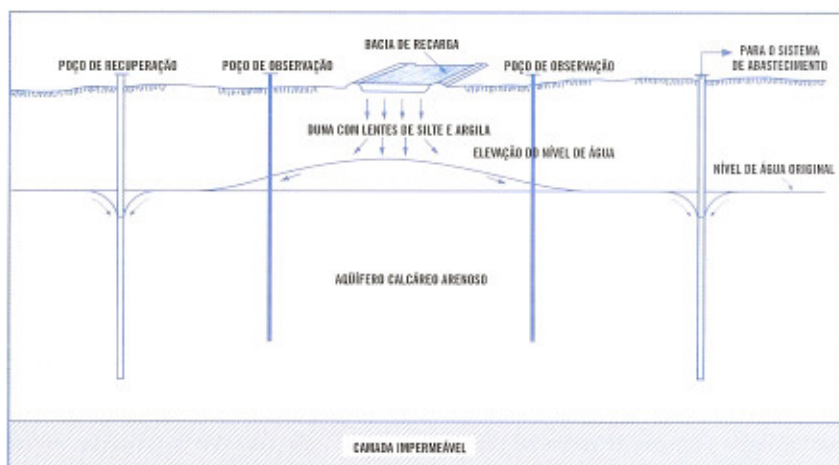


Figura 1 - Esquema de um sistema de recarga artificial através de bacia de infiltração

pode ser efetuada por meio de sistemas de infiltração superficiais, tais como bacias de infiltração, canais modificados ou dotados de bermas ou ainda por meio de esquemas de inundações controladas. A *Figura 1* mostra, esquematicamente, como a recarga é efetuada através de bacias de infiltração. O efluente, após tratamento adequado, é recalado para a bacia de infiltração, de onde percola até o aquífero. Na figura são mostrados os poços de observação, que poderiam ter sido construídos na fase de elaboração dos perfis hidrogeológicos do local, e os poços de recuperação.

A percolação através do solo superficial, camada insaturada e o escoamento no próprio aquífero podem, dependendo das características locais, possibilitar níveis de tratamento significativos. A remoção de organismos patogênicos e de compostos orgânicos e inorgânicos depende da qualidade do efluente a ser infiltrado e das características hidrogeológicas da camada insaturada e do aquífero. Essa caracterização do solo é efetuada por meio de estudos granulométricos e de perfis geológicos obtidos na zona de infiltração, fornecendo informações sobre tipos de solos, perfil litológico da camada insaturada e do aquífero, níveis de água, gradiente regional, locação e volumes estimados da recarga natural, características de poços e bombeamentos existentes, parâmetros do aquífero (transmissividade, condutividade hidráulica saturada, vazão específica, etc.), características de qualidade da água do aquífero em termos dos principais cátions e ânions, poluição existente ou potencial oriunda de aterros ou quaisquer outras fontes e quaisquer outros contaminantes do solo que possam ser lixiviados durante a recarga.

A *Figura 2* mostra, esquematicamente, os diversos processos e operações unitárias que podem ocorrer na zona insaturada, promovendo a diluição, o retardamento e a eliminação de poluentes presentes nos efluentes infiltrados. No aquífero, por meio de escoamento horizontal, podem, também, ocorrer processos de filtração, precipitação e transformações bioquímicas, colaborando para o polimento final do efluente infiltrado, antes que este atinja os poços de recuperação. As áreas hachuradas indicam, aproximadamente, a eficiência relativa da remoção de poluentes, de acordo com a profundidade do aquífero. Note-se que a camada superior de solo é a que tem maior potencial de remoção devido à formação, à medida que a infiltração ocorre, de "smutzdecke", como ocorre em filtros lentos de areia.

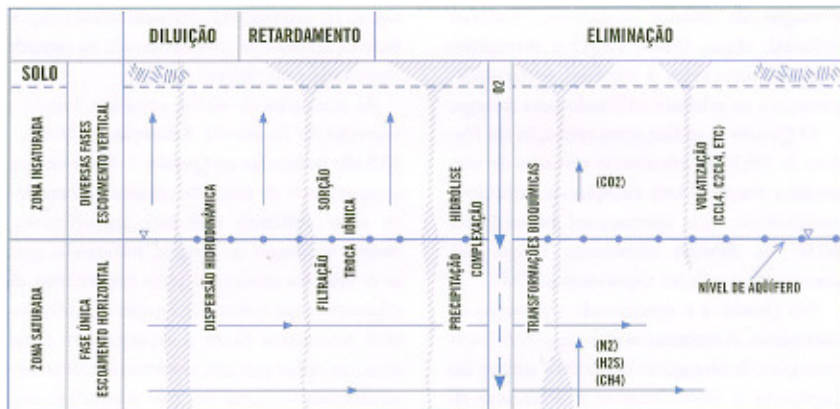


Figura 2 - Remoção de poluentes na camada insaturada e no aquífero

#### 4. Determinação experimental da capacidade do solo em remover poluentes - Tratamento solo-aquífero

A capacidade do aquífero em remover poluentes, designada como Tratamento Solo-Aquífero, ou TSA, é avaliada por meio de ensaios de laboratório, efetuados em colunas com 0,30 m de diâmetro. Amostras indeformadas representativas são coletadas na área de infiltração e colocadas em uma bateria de colunas para permitir, simultaneamente, a recarga com diversas taxas de infiltração. Essas taxas variam de 0,3 a 3,0 m/dia, dependendo das características do solo. O efluente, após passar por tratamento preliminar, é aplicado na superfície da coluna a taxas de infiltração determinadas e amostras são coletadas na superfície e a diversas profundidades, por meio de pontos de tomada colocados ao longo das colunas. Esses ensaios permitem determinar, em função das

taxas de infiltração, a profundidade mínima de camada insaturada necessária para que o efluente apresente qualidade adequada para integrar o aquífero.

O sistema TSA vem sendo empregado com sucesso em diversos países, entre os quais a Holanda (infiltração em dunas nas regiões de Castricum, Leiduin e Haia), Israel (região do Dan), Chipre (Limassol), Estados Unidos (Cedar Creek, no condado de Nassau, e em diversos sistemas localizados nos Estados da Califórnia, Arizona e Nevada), Polônia (Wroclaw) e Japão (Akishima).

Os Quadros 1 a 6 apresentam a capacidade de remoção de poluentes de diversos aquíferos recarregados com efluentes domésticos tratados, em operação nos Estados Unidos. O Quadro 1 mostra a concentração de coliformes totais e fecais e de *S. fecalis* antes e após o TSA, efetuado por meio de uma bacia de infiltração.

O Quadro 2 apresenta as eficiências de

PARÂMETRO	UNIDADES	DESEMPENHO	
		Concentração média antes do SAT	Concentrações depois do SAT
Bactérias (total)	No./ mL	100.000	40 - 120
Coliformes totais	NMP/ 100mL	400	0 - 20
<i>E. coli</i>	NMP/ 100mL	50	0
<i>S. fecalis</i>	NMP/ 100mL	150	0

Quadro 1 - Remoção de coliformes e organismos patogênicos em um sistema TSA

PARÂMETRO	UNIDADES	DESEMPENHO		
		Efluente	Recuperado	Eficiência (%)
Sólidos Suspensos	mg/L	34	<1	>99,5
Turbidez	NTU	13	0,5	95
Algas	No./mm <sup>3</sup>	100	0	100
DBO (particulado)	mg/L	14	0	100
DQO (particulado)	mg/L	38	0	100
Nitrogênio Orgânico (particulado)	mg/L	3	0	100

Quadro 2 - Remoção de material particulado e colóides em um sistema TSA

remoção de sólidos suspensos, material coloidal, algas, DBO, DQO e nitrogênio orgânico associados a material particulado, presentes no efluente utilizado para recarga.

O *Quadro 3* indica uma remoção de fósforo de 98,5% e eficiências elevadas de elementos traços. Com exceção de cádmio e molibdênio, que apresentam remoção de 67%, os demais elementos traços são removidos a valores superiores a 70%.

No *Quadro 4* é apresentada a remoção de nitrogênio. A amônia é removida a 99,6% e as remoções de nitrogênio orgânico e nitrito são superiores a 90%. Note-se o acréscimo de 98% na concentração de nitrato, após a pas-

sagem no sistema SAT, demonstrando a significativa nitrificação proporcionada na camada insaturada e no próprio aquífero.

As remoções de sódio, potássio, boro e a variação do Índice de Adsorção de Sódio – IAS são indicadas no *Quadro 5*. Note-se que a capacidade de troca de cátions do conjunto solo aquífero diminui significativamente ao longo do tempo, indicando que, se o TAS foi projetado para tratamento de efluentes com vistas à irrigação de culturas, será necessário fazer a recarga em outra área, ou optar por um sistema de tratamento alternativo, uma vez que o aquífero utilizado atingiu seu nível de saturação no que

concerne à remoção dos elementos para os quais foi projetado.

O *Quadro 6* mostra as eficiências na remoção de compostos orgânicos dissolvidos. Note-se a elevada remoção de DBO solúvel (superior a 90%) e de Carbono Orgânico Dissolvido (superior a 80%). A redução da Absorbância em UV com comprimento de onda de 234 nm é também bastante significativa, demonstrando a capacidade de remoção de ácidos húmicos e fúlvicos, precursores da formação de trihalometanos, quando é praticada a desinfecção com cloro.

O *Quadro 7* ilustra a tecnologia de recarga artificial com efluentes tratados, mostrando as características de alguns sistemas em operação nos Estados Unidos. Como pode ser verificado, as taxas anuais de aplicação e as taxas de aplicação diárias dependem da disponibilidade de efluentes, das características do solo e da operação das bacias de infiltração. As características do solo e do efluente sendo percolado estabelecem as operações de manutenção da parte superficial das bacias, evitando a colmatção das camadas superiores.

PARÂMETRO	UNIDADES	DESEMPENHO		
		Antes do SAT	Após SAT	Eficiência (%)
Fósforo	mg/L	2,1	0,03	98,5
Cádmio	µg/L	3	<1	>67
Cromo	µg/L	10	<3	>70
Cobre	µg/L	18	5	72
Molibdênio	µg/L	9	<3	>67
Níquel	µg/L	38	10	74
Selênio	µg/L	8	<2	>75

**Quadro 3 - Remoção de fósforo e elementos traços em um TSA**

PARÂMETRO	UNIDADES	DESEMPENHO		
		Antes do SAT	Após SAT	Eficiência (%)
Amônia	mg/L	5,0	< 0,02	-
N Orgânico	mg/L	7,7	0,7	-
Nitrito	mg/L	0,2	0,02	-
Nitrato	mg/LL	0,1	6,5	-
N Total	mg/L	13	7,2	45
N (filtrado)	mg/L	10	7,2	28

**Quadro 4 - Remoção de nitrogênio em um TSA**

PARÂMETRO	UNIDADES	DESEMPENHO		
		Concentração média antes do SAT	Concentração recuperado enquanto capacidade de troca é ativa	Concentração recuperado após exaustão da capacidade de troca
Sódio	mg/L	140	25 - 110	120 - 150
Potássio	mg/L	24	1 - 5	20 - 25
LAS	-	5,3	2,3 - 2,8	3,2 - 4,0
Boro	mg/L	0,33	0,06 - 0,18	0,20 - 0,35

**Quadro 5 - Variação da capacidade de troca iônica em um TSA**

PARÂMETRO	UNIDADES	DESEMPENHO		
		Antes do SAT	Após SAT	Eficiência (%)
DQO	mg/L	46	10,9	76
COD	mg/L	18	3,2	82
KmnO <sub>4</sub> (consumo como O <sub>2</sub> )	mg/L	9	1,7	81
Absorbância, UV <sub>254</sub>	cm <sup>-1</sup> x 10 <sup>3</sup>	239	48	80
Detergentes	mg/L	1,1	0,25	77
Fenóis	?g/L	5	?1,4	?72

**Quadro 6 - Remoção de compostos orgânicos dissolvidos em um TSA**

## 5. Conclusões e recomendações

A prática de recarga artificial de aquíferos está bem estabelecida em nível internacional e não apresenta, quando projetada e operada adequadamente, perigo de contaminação de aquíferos. Constitui prática convencional de engenharia, que leva em conta todas as variáveis de importância para projetar sistemas econômicos, operacionais e com riscos aceitáveis, tanto do ponto de vista ambiental como de saúde pública.

Quando adequadamente regulamentada e praticada no Brasil, a recarga artificial trará benefícios, introduzindo uma nova dimensão para a disposição de efluentes domésticos, proporcionando, simultaneamente, aumento da disponibilidade de água, proteção de aquíferos costeiros contra salinização, controle de subsidência de solos e sustentação de níveis de aquíferos freáticos submetidos a condições inadequadas de demanda.

A recarga artificial por injeção direta envolve custos elevados, tanto aqueles associados à construção de poços profundos como à necessidade da produção de efluentes para recarga com qualidade de água muito próxima à da água potável.

A recarga por sistemas de infiltração, que se beneficia do tratamento solo aquífero, demanda condições especiais para permitir que os efluentes percolados mantenham a integridade dos aquíferos.

As condições e características consideradas ideais para sistemas TSA são associadas aos seguintes fatores:

- solos permeáveis com taxas de infiltração razoáveis;
- camada insaturada com espessura suficiente para estocar o volume de recarga necessário;
- ausência de camadas impermeáveis suspensas que causem excessiva acumulação da água infiltrada antes de atingir o aquífero;
- distribuição granulométrica na camada insaturada superior, que suporte a prática do sistema TSA;

- coeficientes de transmissividade que não causem retenção excessiva de água no aquífero e
- aquíferos não confinados.

Os custos associados aos sistemas TSA são, em média, 40% menores do que os custos de sistemas de tratamento convencionais equivalentes, operando na superfície.

Os sistemas TSA proporcionam níveis de tratamento elevados em termos de compostos orgânicos (remoção de DBO, DQO, CODT), organismos patogênicos (coli-formes fecais, criptosporídeos, giardia e vírus) e compostos inorgânicos (nitrogênio e metais pesados).



O técnico da Sabesp, Eraldo Rodrigues Araújo, observa vidros de água sem tratamento e tratada; em cinco anos, degradação mais que dobrou os custos para tratá-la e deixá-la potável.

(São Paulo, SP, 23/07/2004.  
Foto: Marlene Bergamo/Folha Imagem)

	TAXA DE APLICAÇÃO (m <sup>3</sup> /ano) <sup>(1)</sup>	TAXA DE PERCOLAÇÃO (m <sup>3</sup> /dia)	PROGRAMA DE CARREGAMENTO	TIPO DE SOLO	MANUTENÇÃO DA SUPERFÍCIE DAS LAGOAS
Camp Pendelton, CA	-	2,4	Conforme a disponibilidade de efluente.	Areia grossa	Rearranjo dos taludes e remoção de sólidos da superfície em anos alternados.
Hernet, CA	27	0,8	Carrega 1 dia (0,08m), drena 2 dias e seca 1 dia.	Areia média e grossa	Aração periódica das bacias
Oceanside, CA	44	1,4	Carrega até 0,90m, drena, seca e recarrega.	Areia grossa	Escarificação periódica das bacias
Phoenix, AZ	128	0,8	Carrega 10 dias e seca 14 dias	Areia com argila e matéria orgânica na superfície, areia grossa e pedregulho	Escarificação periódica
San Clemente, CA	131	1,5 - 3,0	Carregamento contínuo.	Areia grossa e pedregulho	Nenhuma manutenção
St. Croix, Virgin Island	34	0,3 - 0,6	Carrega 18 dias e seca 30 dias.	Silte, areia e argila	
Whittier Narrows, CA	43	1,5 - 3,0	Carrega 7 dias (1,20m), drena 7 dias e seca 7 dias.	Areia argilosa com matéria orgânica	Escarificação periódica

Quadro 7 - Características operacionais de alguns sistemas TSA em operação nos Estados Unidos

## BIBLIOGRAFIA

ARNOLD, R.G. & QANRUD, D.M. (1998). "Soil Aquifer Treatment - Performance Studies in Simulations Conducted in Column Reactors", a joint study conducted by the University of Arizona and Arizona State University, draft, unpublished.

BOUVER, H., (1991). Role of Groundwater Recharge in Treatment and Storage of Wastewater for Reuse. *Water Science Technology*, n° 24, p. 295-302, UK.

\_\_\_\_\_, & RICE, R.C. (1989). Effect of Water Depth in Groundwater Recharge Basins on Infiltration Rate. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, n° 115, p. 556-568.

City of Tucson. (2001). Wastewater Reclamation Plant Facility - The Sweetwater Wetlands, (2001). *Evaluation of Actual and Projected Wetland Performance*, unpublished.

City of Scottsdale. (2000). Arizona, Water Resources Department, Scottsdale Water Campus, (2000). *Annual Recharge Summary for the period January 1, 2000 to December 31*.

City of Scottsdale. (2000). Arizona, Water Resources Department, Scottsdale Water Campus. *Water Quality Report - An Annual Report on Scottsdale Drinking Water*.

CHANG, A.C.; PAGE, A.L.; ASANO, T.; HESPANHOL, I. (1995). Developing Human Health-Related Chemical Guidelines for Reclaimed Wastewater and Sewage Sludge Applications in Agriculture. In: *Proceedings of the Second International Symposium on Wastewater and Sludge Applications in Agriculture*, IWQA, Iraklio, Crete, 1995.

CRITES, R.W.M. (1985). Micropollutant Removal in Rapid Infiltration, p. 579-608. In: *Artificial Recharge of Groundwater*, Takashi Asno, Ed., 767 p., Butterworth Publishers, USA.

FOSTER, S.S.; GALE, D.; HESPANHOL, I. (1994). Impacts of Wastewater Use and Disposal on Groundwater. *Technical Report WD/94/55*, British Geological Survey, Keyworth, Nottingham, UK.

HAFER, J.L.; ARNOLD, R.G.; LANSEY, K.; CHIPELLO, P.L. (2001). Nitrogen Transformations During Soil-Aquifer Treatment of Wastewater Effluent-Oxygen Effects in Field Studies, draft for submission.

HESPANHOL, I. (1997). *Egitos como recurso hídrico - Parte I: Dimensões políticas, institucionais, legais, econômico-financeiras e socioculturais*. Engenharia, Instituto de Engenharia de São Paulo, n° 523, ano 55, São Paulo.

\_\_\_\_\_. (1993). Water Resources Management and Use of Wastewater - A Case Study - Sultanate of Oman. In: *Integrated Rural Water Management*, FAO, UNDP, WHO, março, Rome, Italy.

\_\_\_\_\_. (2002). Recarga artificial de aquíferos. Cap. VIII, p. 88-102. In: *Revista de Água*. MANCUSO, P.C.S.; SANTOS, H.F.; Eds., 430 p., Manole, São Paulo.

\_\_\_\_\_. (2002). Potencial de reuso de água no Brasil - Agricultura, indústria, municípios, recarga de aquíferos. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, RBRH, vol. 7 n° 4, dezembro. Edição Comemorativa, p. 75-97, Porto Alegre.