

RECARGA ARTIFICIAL DE AQUÍFEROS: OS DESAFIOS E RISCOS PARA GARANTIR O SUPRIMENTO FUTURO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA

André Negrão de Moura¹

Resumo – A super exploração da água subterrânea tem provocado sérios impactos ao meio ambiente em diversas regiões do mundo, logo, a necessidade de recompor os estoques de água subterrânea, seja para garantir o fornecimento futuro de água seja para prevenir os problemas causados pela subsidência do solo, tem levado muitas regiões do mundo a utilizar o efluente de sistemas de tratamento de esgoto sanitário (ESTES) para a recarga artificial de aquíferos (RAA). Este trabalho discute o uso de ESTES para a RAA e apresenta os desafios técnicos e os riscos ambientais e de saúde pública envolvidos nesta alternativa para a recuperação de aquíferos subterrâneos.

Abstract - The over exploration of groundwater has been causing serious environmental impacts around the World, therefore, the need of restore the stock of groundwater, either to guarantee future water supply or to prevent problems caused by soil subsidence, has been leading many places to use sewage treatment plant effluent (STPE) for artificial recharge aquifer (ARA). This paper discusses the use of STPE for ARA and it shows the technical challenges, the environmental as well as public health risks involved.

Palavras-Chave - recarga artificial de aquífero; contaminação.

INTRODUÇÃO

O contínuo processo de impermeabilização do solo, em áreas urbanas e agrícolas, provoca uma drástica redução do volume de água infiltrada no solo e limita, ainda mais, a lenta recarga natural dos aquíferos subterrâneos. Quando a exploração de água subterrânea excede a capacidade de recarga natural do aquífero é inevitável o rebaixamento de seu nível até o esgotamento da água nele armazenada, fato que pode ser acompanhado pela subsidência do solo ou pela penetração da água do mar, em regiões costeiras.

¹ Doutorando em Engenharia Hidráulica e Sanitária pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, bolsista do CT-HIDRO. Av. Prof. Almeida Prado 271, CEP 05508-900, São Paulo, SP, Brasil, fone +55 11 30915538, fax +55 11 30915423, negraoma@yahoo.com.au.

A inexistência ou insuficiência de água superficial em quantidade suficiente para atender as necessidades do homem levaram-no ao longo dos séculos a buscar a água armazenada no subsolo. O crescimento e desenvolvimento das cidades sempre foi sustentado pela disponibilidade de água e tal recurso nunca foi tão explorado quanto nos últimos cem anos. A super exploração de água subterrânea, em áreas carentes de mananciais superficiais, tem exposto à escassez, em maior ou menor grau, populações em todos os continentes, pois a dependência criada sobre a água subterrânea não mais pode ser mantida visto a incapacidade de recarga natural de tais aquíferos.

Diante deste quadro caótico a recarga artificial de aquíferos (RAA) surge como uma alternativa rápida e eficiente para manter ou elevar o volume de água em aquíferos subterrâneos. Entretanto, surge uma questão fundamental a ser respondida: de onde virá a água a ser utilizada para RAA e quais características deverá possuir? Esta ainda é uma questão em aberto mas, diversas iniciativas ao redor do mundo indicam que o efluente de sistemas de tratamento de esgoto sanitário (ESTES) pode ser uma das soluções. Outras alternativas incluem a utilização de água de chuva e de água de mananciais superficiais, particularmente a vazão de cheia destes corpos d'água.

Definida a fonte ou fontes de água a ser utilizada para a RAA, deve-se estabelecer a qualidade requerida para tal aplicação e, este tem sido o principal desafio até o momento. Os diferentes métodos de RAA exigem qualidades mínimas da água a ser utilizada, logo, o uso a que se destina ou se destinará a água do aquífero e, a técnica empregada para a RAA determinarão a qualidade mínima necessária para a água de recarga para cada caso em particular.

No tocante a RAA com vista a utilização da água do aquífero para fins potáveis há controvérsias quanto a sua segurança, visto o desconhecimento dos efeitos sobre a saúde humana de grande parte dos compostos orgânicos atualmente produzidos e, em grande parte presentes nos esgotos sanitários, além dos diversos agentes patógenos presentes no esgoto, particularmente os enterovírus, que atualmente são considerados os mais perigosos por serem capazes de provocar doenças no homem a partir poucos exemplares.

A despeito dos riscos e dúvidas existentes sobre a utilização de ESTES para a RAA com fins de abastecimento humano, esta é uma alternativa que deve ser considerada pelas aglomerações humanas que estabeleceram seu modelo de crescimento populacional e de sustentação econômica sobre a exploração da água subterrânea, visto que não dispõem de outra alternativa para seu suprimento de água. Entretanto, todos os esforços devem ser feitos para a eliminação de agentes biológicos e químicos capazes de afetar a saúde humana e/ou prejudicar a qualidade da água dos aquíferos recarregados artificialmente.

Merece particular atenção o processo de tratamento solo-aquífero (TSA), visto que este método está frequentemente associado à RAA através de bacias de infiltração, que é a técnica mais amplamente empregada para fins de recarga. O TSA deve ser considerado com cuidado, pois a

capacidade do solo de reter os contaminantes presentes no esgoto é limitada, bem como é limitada a capacidade do aquífero de dispersá-los e/ou diluí-los. O uso indiscriminado do TSA pode provocar tanto a contaminação do solo quanto do aquífero e vir a se transformar de uma solução para a RAA para um novo problema a ser resolvido.

OBJETIVOS DO TRABALHO

Este trabalho possui como objetivo geral apresentar uma análise global do reúso indireto de esgoto sanitário através da RAA, cujo principal uso seja o abastecimento humano. São objetivos específicos do trabalho apresentar as implicações na segurança sanitária e ambiental da utilização de água captada em aquíferos recarregados artificialmente com ESTES e, a avaliação dos resultados de diferentes estudos de caso sobre o tema.

METODOLOGIA

A metodologia utilizada neste trabalho constituiu-se exclusivamente da revisão bibliográfica de publicações técnicas, científicas e de negócios, as quais abordam, em maior ou menor grau, os objetivos pretendidos pelo artigo.

DISCUSSÃO

A utilização contínua, crescente e descontrolada da água subterrânea ao longo do último século culminou com exaustão da capacidade dos aquíferos subterrâneos em diversas regiões do mundo, onde foram super explorados e, apesar de não ser um fenômeno generalizado, estende-se por vastas regiões em diversos países.

Muitos dos países que tem grande dependência da água subterrânea já empreendem ações, em diferentes estágios, para assegurar a continuidade do suprimento desta fonte de água, seja para fins potáveis ou não.

Regiões como o norte da China, onde vivem 550 milhões de pessoas, que é responsável por 2/3 da produção agrícola chinesa e dispõe de apenas um quinto da água disponível no país, enfrenta uma grave escassez de água subterrânea. O aquífero que se estende da região do norte de Xangai até o norte de Beijing declina a uma taxa média de 1,5 m/ano e, o lençol freático sob Beijing baixou 2,5 metros só em 1999, acumulando um declínio de aproximadamente 59 metros desde 1965. Para combater este quadro crítico e garantir o suprimento futuro de água tanto para o consumo humano quanto para as atividades industriais e agrícolas, o governo chinês está empreendendo um

ambicioso projeto de reúso de esgoto, que atualmente está no estágio de avaliação dos resultados de estações piloto de recuperação de água. Dentre os diversos usos previstos pelo projeto inclui-se a RAA com fins de abastecimento humano (BROWN, 2000; ZHENG, 2002).

Países como os Estados Unidos da América e Israel utilizam o ESTES para a RAA há várias décadas e, os estudos epidemiológicos realizados até o momento não evidenciaram qualquer relação entre o consumo de água captada em aquíferos recarregados com ESTES e o incremento da incidência de doenças (SLOSS *et alii*, 1996).

Tipos de aquíferos e seus processos de recarga natural

Tradicionalmente os aquíferos subterrâneos são classificados em: confinados, que podem localizar-se acima ou abaixo de uma camada impermeável; semiconfinados, que recebem ou perdem água para os aquíferos superiores ou inferiores através das camadas que os separam; e não confinados, que possuem o lençol freático livre. Tal classificação depende das características geológicas da área onde se localiza o aquífero. Caso o aquífero seja muito profundo ele pode fazer parte de um sistema regional que não coincide com sua área de drenagem, neste caso, a água subterrânea move-se de uma bacia hidrográfica para outra, estes aquíferos são classificados como regionais e normalmente possuem uma extensão muito maior que sua profundidade (KARVONEN, 2002).

A recarga natural dos aquíferos dá-se em áreas sob sua influência que combinem dois fatores fundamentais: a disponibilidade de água; seja oriunda de precipitação pluviométrica ou de corpos d'água superficiais; e a presença de formações geológicas que permitam a infiltração e transporte subterrâneo da água (e. g. solos arenosos, fraturas).

A velocidade da água em aquíferos subterrâneos é normalmente lenta e pode levar meses, anos e até séculos para que ela saia de um dado aquífero, o fluxo em águas subterrâneas pode ser dividido em saturado e insaturado. A velocidade pode ser elevada quando a área ocupada pelo aquífero apresenta ocorrências geológicas como fraturas (e.g. basalto) e solos de elevada permeabilidade (e.g. cascalho), nestes casos a água pode levar poucos dias para percorrer a distância entre a área de recarga e zona de descarga (ou poço de extração).

Necessidade e objetivos da RAA

A recarga artificial de um aquífero se faz necessária quando a taxa de exploração de suas águas é superior a sua taxa de recarga natural, o que acarreta o rebaixamento de seu nível e a redução do volume de água nele disponível, que por sua vez traz como conseqüências o colapso estrutural do solo (subsidência); que tende a rearranjar sua estrutura e acaba por provocar recalques na superfície, pois os vazios deixados pela água intersticial do solo foram suprimidos; que pode causar sérios prejuízos materiais e, nas regiões costeiras, permitir o avanço da água do mar

continente à dentro, pois a pressão exercida pela água do mar passa a ser maior que a exercida pela água do aquífero, já que esta deixa de ser descarregada no mar e passa a receber água marinha, o que implica na salinização da água subterrânea e no comprometimento de sua qualidade e utilidade.

Neste contexto, surge a recuperação de água de ESTES como uma alternativa tecnicamente viável para promover o reúso indireto da água através da RAA. Apesar de constituir-se numa alternativa factível, a prática da aplicação de ESTES apresenta outros desafios além dos aspectos de engenharia envolvidos, sendo os principais deles, garantir a segurança sanitária e a qualidade da água do aquífero de forma a assegurar que não venha a provocar danos à saúde humana ou a degradação do próprio aquífero.

A RAA pode envolver diversos objetivos dentre os quais incluem-se:

- Manutenção ou elevação do nível de água no aquífero;
- Controle da intrusão marinha em aquíferos costeiros;
- Controle da subsidência do solo;
- Controle de inundações; e
- Armazenamento subterrâneo de água (de origem fluvial, pluvial ou recuperada de ESTES).

Segundo ASANO (1999) dentre as vantagens de utilizar o armazenamento subterrâneo de água incluem-se:

- O custo da RAA pode ser menor que a construção de reservatórios de água convencionais;
- O aquífero subterrâneo serve como um eventual sistema de distribuição subterrâneo de água, o que elimina a necessidade de canais e tubulações para sua distribuição;
- No aquífero subterrâneo não há perda por evaporação e são evitados os problemas de gosto e odor provocados pela poluição e pela floração de algas, que normalmente afetam as águas superficiais; e
- A implantação de reservatórios superficiais em áreas disponíveis pode ser inviabilizada devido a restrições ambientais (impactos causados ao meio ambiente).

É consenso entre diversos autores (e. g. ASANO; FOX, 1999; HESPANHOL, 2002) que a inclusão da RAA no projeto de reúso de esgoto pode gerar benefícios psicológico e estético junto aos consumidores, o que facilita a aceitação pública da água recuperada.

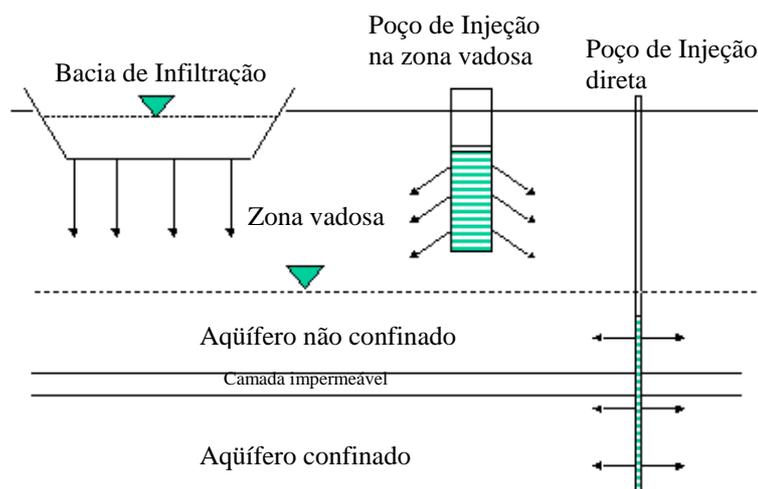
Apesar de ser uma alternativa de menor custo, permitir insignificante perda por evaporação, eliminar os problemas de gosto e odor, ser uma reserva estratégica para tempos de escassez e, constituir-se em um investimento econômico, a água armazenada no subsolo não pode ser recuperada integralmente e, somente uma fração da água introduzida no solo é passível de ser dele extraída.

Principais métodos utilizadas para a RAA

São três os principais métodos utilizados para a RAA (FOX):

- Bacias de infiltração;
- Poços de injeção na zona vadosa; e
- Poços de injeção direta.

A FIG. 1 mostra os três métodos citados.



FONTE: FOX (1999)

Figura 1 – Métodos de recarga artificial de aquíferos.

Bacias de infiltração

Este é o método mais simples, antigo e amplamente utilizado para executar a RAA, pois baseia-se na simples infiltração da água destinada à recarga. O método é preferido por permitir o uso eficiente do espaço e requerer uma manutenção simples e rápida, sendo sua utilização indicada para áreas que disponham de topografia favorável e solos que apresentem boa permeabilidade. A recuperação da água de ESTES pode ser relativamente fácil através do tratamento solo-aquífero (TSA) em locais que disponham de condições hidrogeológicas que favoreçam o uso de bacias de infiltração (ASANO).

No passado era considerado que apenas um pré-tratamento do esgoto sanitário ou sua passagem por uma lagoa de estabilização seria o suficiente antes de ser infiltrado no solo, no entanto, devia-se evitar elevadas concentrações de algas no efluente de tais sistemas, pois quanto maior fosse sua concentração tanto maior seria a velocidade de colmatação do solo e, portanto, menor seria a vida útil da bacia.

Segundo ASANO, diante do crescimento da preocupação com os contaminantes químicos (e.g. compostos orgânicos) e agentes biológicos (e.g. cistos de protozoários) o tratamento primário e secundário do esgoto sanitário tornou-se insuficiente para assegurar um ESTES de boa qualidade,

logo, para se evitar a contaminação da água subterrânea se deve submeter o ESTES à um tratamento terciário (e.g. filtração seguida de cloração).

Admite-se que o tratamento complementar necessário para o ESTES utilizado em recarga de aquífero, poderia ser alcançado pelo processo TSA, ou seja, a filtração através da camada vadosa do solo e o transporte através do aquífero proveria um tratamento adequado e garantiria a manutenção da qualidade da água do aquífero.

Apesar da qualidade da água após o TSA ser melhor que a do ESTES utilizado ela ainda pode ser inferior à da água contida no aquífero, portanto devem ser tomados os devidos cuidados para evitar a contaminação do aquífero. Dentre as medidas de projeto e manejo recomendadas por ASANO incluem-se:

- Utilizar uma pequena parte da área do aquífero para realizar a recarga; e
- A distância entre as bacias de infiltração e poços deve ser a maior possível (normalmente entre 50 –100 metros).

Dentre as vantagens da utilização de bacias de infiltração para a RAA incluem-se:

- Permitir a reposição da água subterrânea onde sua retirada é excessiva, tal como em áreas urbanas e agrícolas; e
- A infiltração superficial apresenta os benefícios do tratamento no solo e a facilidade de transporte pelo aquífero.

O agente biológico mais preocupante nos projetos de RAA, para fins de abastecimento humano, é o enterovírus, visto que poucos indivíduos são suficientes para provocar doenças, além de ser extremamente difícil sua detecção, em análises de rotina, na água recuperada destinada à RAA, irrigação de jardins , produção de alimentos e demais usos desejados.

Para evitar a contaminação da água subterrânea com o enterovírus, ASANO recomenda que as bacias de infiltração possuam uma altura de infiltração superior a três metros (utilizando o TSA). Para solos com taxa de infiltração menores que 5 m/d, a taxa de remoção de vírus é aproximadamente uma curva semi-log ($k = 0,007 \text{ log/cm}$) contra a taxa de infiltração, resultando em aproximadamente 99,2% ou 2,1 logs de remoção, para uma profundidade de três metros de solo. A estimativa total de remoção de vírus pelo processo de tratamento, zona insaturada e separação horizontal (tempo de retenção no aquífero) está apresentada nas TAB. 1 e 2.

Tabela 1 - Remoção logarítmica de vírus estimada para as diferentes configurações dos sistemas de tratamento de esgoto sanitário.

Tipo de tratamento	Remoção logarítmica de vírus
Primário/secundário / filtração / remoção de orgânicos / desinfecção	7
Primário/secundário / filtração / desinfecção	6

FONTE: ASANO (1999).

Tabela 2 - Estimativa da remoção total de vírus em sistemas de recarga artificial de aquífero com a combinação dos sistemas de tratamento de esgotos, do TSA e da retenção na água subterrânea^a.

Tipo do tratamento	Remoção logarítmica de vírus
Primário/secundário / filtração / remoção de orgânicos / desinfecção	17
Primário / secundário / filtração / desinfecção	16
Primário / secundário /desinfecção	14

FONTE: ASANO (1999).

^a Foi assumido uma taxa de infiltração de 7,3 m/d para a remoção de vírus pelo solo na zona insaturada.

O TSA é utilizado para a remoção de contaminantes nas zonas insaturada (zona vadosa) e saturada do aquífero, mas tem uma capacidade limitada para remoção dos contaminantes presentes nas águas de recarga e, quando a concentração de contaminantes no solo excede sua capacidade de retenção (via adsorção), os contaminantes são carregados para o aquífero. Alguns autores consideram o TSA inadequado, pois é visto como um processo que sobrecarrega o solo com contaminantes e cria áreas contaminadas (LEE; JONES-LEE, 2000).

Dentre as desvantagens da utilização de bacias de infiltração para a RAA incluem-se:

- Ocupa grandes áreas;
- Apresenta perdas por evaporação; e
- Pode criar áreas contaminadas.

Poços de injeção na zona vadosa

A RAA através da injeção de água diretamente na zona vadosa do solo agrega os benefícios do TSA e a eficiência da injeção direta. Este método é indicado para as seguintes situações:

- Locais onde o custo da terra inviabiliza a utilização de bacias de infiltração; e
- Quando se deseja uma tecnologia mais simples e barata que a injeção direta.

Vantagens e desvantagens do método:

➤ Vantagens

- ✓ Pode ser implementado próximo aos sistemas de abastecimento de água, o que reduz o custo do sistema de transporte;
- ✓ Opção mais econômica que as bacias de infiltração, quando o custo da terra for elevado, e os poços de injeção direta; e
- ✓ Reduzida perda por evaporação, quando comparada às bacias de infiltração.

➤ Desvantagens

- ✓ Requer um ESTES de elevada qualidade; e
- ✓ Pode criar áreas contaminadas, mas com menor potencial que as bacias de infiltração.

Poços de injeção direta

Este método de RAA permite introduzir a água de recarga diretamente no aquífero, seja ele confinado ou não, característica que requer um tratamento avançado do ESTES, afim de evitar a contaminação da água do aquífero. Segundo ASANO esta técnica é praticada nas seguintes situações:

- Onde o aquífero está profundo ou a topografia ou o custo da terra torna inviável a utilização de bacias de infiltração;
- Quando a injeção direta é mais eficiente na criação de barreiras em aquíferos costeiros, para o controle da intrusão salina;
- Quando se deseja uma rápida recomposição do nível do aquífero; e
- Quando é a única alternativa para recarga artificial do aquífero.

Vantagens e desvantagens do método:

➤ Vantagens

- ✓ Rápida elevação do nível de água do aquífero;
- ✓ Eficiente para o controle de intrusão salina; e
- ✓ Único método capaz da RAA confinados.

➤ Desvantagens

- ✓ Requer um ESTES de elevada qualidade (tratamento terciário);
- ✓ Custo elevado para execução dos poços, aquisição de equipamentos e operação do sistema; e
- ✓ Complexa operação do sistema.

Os poços de injeção, assim como as bacias de infiltração, devem ser construídos tão distantes quanto possível dos poços de extração, pois assim permitirá que a água de recarga permaneça mais tempo no aquífero. Esta separação de espaço e tempo contribui para a completa mistura da água de recarga com a água presente no aquífero, de tal forma que o ESTES perde sua identidade.

Custos associados às diferentes metodologias de RAA

Segundo FOX, os principais custos, tipos de tratamentos necessários, indicações de uso, e demais especificidades para cada método de RAA podem ser resumidas de acordo com a TAB. 3.

Tabela 3 - Principais características das metodologias de RAA.

Tipos de RRA	Bacias de recarga	Poços de injeção na zona vadosa	Poços de injeção direta
Tipo do aquífero	Livre	Livre	Livre ou confinado
Pré-tratamento requerido	Tecnologia simples	Remoção de sólidos	Tecnologia avançada
Custo de capital estimado (US\$)	Solo e sistema de distribuição	25.000-75.000 / poço	500.000-1.500.000 / poço
Capacidade	1.000-20.000 m ³ /ha.d	1.000-3000 m ³ /poço.d	2.000-6.000 m ³ / poço.d
Manutenção necessária	Secagem e raspagem	Secagem e desinfecção	Desinfecção e reversão de fluxo
Vida útil estimada	>100 anos	5-20 anos	25-50 anos
Tratamento solo aquífero	Zonas vadosa e saturada	Zonas vadosa e saturada	Zona saturada

FONTE: Adaptado de FOX (1999).

Os custos estimados com o uso das bacias de recarga são muito variáveis pois dependem das taxas de infiltração e do valor da terra. As taxas de infiltração são função da condutividade hidráulica do solo e do acúmulo de água no lençol subterrâneo. Taxas médias de infiltração precisam considerar o ciclo de operação de recarga das bacias, que inclui os períodos de enchimento, infiltração e secagem.

Apesar de refletir os custos da RAA nos EUA e não ser possível generalizar indistintamente para qualquer localidade, os custos apresentados por FOX dão uma indicação de qual é a ordem de grandeza do capital requerido para um projeto de RAA.

Estudos de caso

Montebello Forebay, Los Angeles County, EUA (SLOSS *et alii*,1996)

Este estudo epidemiológico teve por objetivo avaliar os possíveis impactos à saúde humana decorrentes do consumo de água oriunda de aquíferos recarregados com ESTES, em uma das localidades que a mais tempo executam a RAA nos EUA.

Informações básicas sobre o estudo:

- Localização: Montebello Forebay, Condado de Los Angeles, EUA;
- População atendida em 1990: 900.000 (mais de 10% da população de Los Angeles na época);
- População de controle na época: 700.000 habitantes distribuídos em três regiões de Los Angeles, sendo uma de Montebello;
- Quantidade existente de sistemas de água: 66 (1960-1991);
- Sistemas que utilizavam algum percentual de ESTES : 58 (0-4%: 14 sistemas; 5-19%: 19 sistemas; 20-31%: 25 sistemas;
- Tipo de tratamento utilizado: Terciário (sedimentação, lodo ativado - eficiência destes dois estágios de tratamento na remoção de sólidos era de 90% - filtração (em meio simples ou duplo), desinfecção com cloro e descloração (para evitar a formação de compostos orgânicos halogenados após a saída do efluente tratado da estação)). O esgoto sanitário atualmente é tratado em 3 estações (de 1962 até 1973 foi tratado na Whittier Narrows Water Reclamation Plant apenas com a cloração do efluente do tratamento secundário; em 1973 entrou em operação a estação de San Jose Creek, que fornecia o efluente do sistema secundário para a RAA e para a Pomona Water Reclamation Plant; em 1978 as três estações foram adaptadas para a filtração, cloração e descloração);
- Método de recarga utilizado: A recarga é realizada através de bacias de infiltração. O ESTES é infiltrado em camadas de solo que variam de 3 a 12 metros antes de atingir o lençol freático. A área total das bacias de infiltração somam 280 ha. A operação das bacias de infiltração consiste de um ciclo de 21 dias; 5 dias para enchimento até o nível da lagoa se manter constante e 16 dias para infiltração e secagem;
- Volume infiltrado: por imposição legal o ESTES deve ser misturado com outras fontes de água; inclusive a do próprio aquífero (não existe uma legislação específica que determine a mistura na superfície antes da recarga ser efetuada) para que possa ser introduzido num aquífero - a parcela de ESTES que pode ser introduzida no aquífero não pode ser superior a 50% de toda a água introduzida em qualquer ano no aquífero. No caso de Montebello, o limite é de 35% do volume médio de recarga durante 3 anos consecutivos e, o volume máximo permitido é de $7,4 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{ano}$ e $18,5 \times 10^7 \text{ m}^3/3\text{anos}$. A diluição é considerada importante para reduzir a concentração dos contaminantes em qualquer das fontes de água utilizadas para a recarga;
- Caracterização do ESTES: Foram identificados os seguintes compostos:
 - ✓ Vírus: ausentes em todas as 174 amostras, coletadas nas 4 estações produtoras, utilizadas no estudo;

- ✓ Compostos traço detectados: cloreto de metileno, clorofórmio, tricloroetileno, tetracloroetileno, fenóis clorados e ftalatos. Estes compostos, embora presentes, estavam abaixo dos limites impostos pela United States Environmental Protection Agency e pelo California State Department of Health Services;
- Estudos toxicológicos: Foi utilizado o teste de Ames (Salmonella Microsome Mutagen Assay) e, a mutagenicidade do ESTES foi considerada intermediária entre a água de chuva (elevada mutagenicidade) e a água do Rio Colorado (baixa mutagenicidade). Também foram realizados testes para verificar os efeitos carcinógenos do ESTES sobre mamíferos, mas nada foi constatado; e
- Estudos de percolação: Concluiu-se que os compostos orgânicos traços não eram satisfatoriamente removidos, mas foram biodegradados por microrganismos presentes na subsuperfície do material. A taxa de degradação dependeu da disponibilidade de microrganismos, da presença de oxigênio, do pH e de nutrientes. A capacidade de absorção foi variável, pois a introdução repetida de ESTES modificou as propriedades geotécnicas do solo ao longo do tempo.

Este estudo epidemiológico utilizou duas abordagens: a comparação geográfica e o levantamento domiciliar; e investigou os efeitos, de curto e longo prazo, do uso de ESTES sobre a saúde humana, sua conclusão foi de que 30 anos de RAA com ESTES não afetou a taxa de mortalidade da população abastecida com água proveniente dos aquíferos recarregados e, que a incidência de doenças infecciosas e câncer mostrou-se idêntica à das áreas de controle.

Agadir, Marrocos

ASANO cita um estudo realizado por BENNANI *et alii* (1992) cujo objetivo foi executar a RAA através de bacias de infiltração na cidade de Agadir, Marrocos.

O sistema de tratamento de esgoto era realizado em lagoas anaeróbias de estabilização (DQO do esgoto bruto = 1.190 mg/L) e 1.000 m³/d de efluente altamente concentrado era infiltrado em um conjunto de 5 bacias de infiltração. As bacias possuíam 1.500 m²/cada, possuindo um leito de filtragem; de areia do deserto; com 2 metros de espessura. As lagoas anaeróbias de estabilização; com volume de 1.500 m³, profundidade entre 3 a 4 metros e tempo de detenção teórico de 2 dias; eram utilizadas para remoção de sólidos (40 - 50%) e matéria orgânica (50 - 60%). O ciclo de operação era de 24 horas; 8 de enchimento e 16 de drenagem.

O efluente das lagoas foi infiltrado a uma taxa de 1m/d, esse processo apresentou remoção de quase 100% dos sólidos suspensos, 95% da DQO, o nitrogênio apresentou-se 85% na forma oxidada (nitrito e nitrato) e 56% foi removido. O objetivo imediato do projeto era utilizar a água captada, extraída do subsolo, para fins agrícolas e paisagísticos, mas também se considerava a

utilização para fins potáveis. A eficiência do sistema de tratamento e a qualidade do efluente das lagoas são apresentados na TAB. 4.

Tabela 4 - Qualidade microbiológica do esgoto, do efluente das lagoas de estabilização e da água percolada.

Agentes biológicos	Esgoto bruto	Efluente das lagoas	Água percolada	Eficiência total de remoção
Coliforme fecal (nº/100 mL)	6x10 ⁶	5x10 ⁵	327	4.26 logs
Estreptococo fecal (nº/100mL)	2x10 ⁷	1.6x10 ⁶	346	4.78 logs
Ovos de nematóides (nº/L)	139	32	0	100 %
Ovos de cestóide (nº/L)	7	18	0	100 %
Ovos de helmintos (nº/L)	214	47	0	100 %

FONTE: BENNANI *et alii* (1992) apud ASANO (1999).

No passado esse processo de tratamento foi considerado suficiente para a eliminação dos contaminantes químicos e biológicos presentes no esgoto sanitário, mas o conhecimento adquirido com o passar dos anos sobre os riscos oferecidos por tais contaminantes mudou esta visão. Agadir é um exemplo de RAA que deve ser evitado para fins potáveis, pois o processo de tratamento utilizado pode ser insuficiente para salvaguardar a saúde dos usuários e evitar a poluição e a conseqüente degradação do aquífero recarregado.

Orange County, California , EUA (OCWD, 2002)

O Orange County Water District (OCWD) é uma agência estadual criada em 1993 para gerenciar a água subterrânea no norte e no centro do Orange County, onde a água subterrânea representa 75% do total de água fornecida para uma população de 2 milhões de habitantes e, tem um acréscimo anual no orçamento da ordem de 70 milhões de dólares. O OCWD é líder mundial na recuperação e dessalinização de água e opera a mais avançada estação de recuperação de água já construída, a Water Factory 21.

O OCWD utiliza um sistema terciário de tratamento; que inclui osmose reversa, microfiltração, luz ultravioleta e peróxido de hidrogênio; produz um ESTES que atende os padrões de potabilidade estadual e federal, que é utilizado para controle da cunha salina e para a RAA. O OCWD está renovando seu sistema de água subterrânea a um custo estimado de US\$ 400 milhões (o projeto deve ser finalizado em 2007).

OCWD opera mais de 650 ha de áreas de RAA; onde executa a recarga através de poços de injeção e bacias de infiltração; e 190 ha de terras úmidas construídas, o sistema foi projetado para

remoção de nitrogênio das águas do Rio Santa Ana; principal fonte de recarga do aquífero do Orange County, cujo sistema é composto por 50 lagoas que estão em operação desde julho de 1992; a remoção de nitrato é da ordem 20 t/mês, o que reduz sua concentração de 10 mg/L para 1 mg/L. Esta área situa-se à montante da barragem Prado, no vizinho Riverside County, e foi permitido ao OCWD utilizar 15% da vazão do Rio Santa Ana (algo em torno de 40 m³/s) para escoar através das lagoas.

O reúso de água no Orange County é motivado pela insuficiência de água na região, a dependência de sua importação de outras regiões e, a dificuldade de sua obtenção em determinadas épocas do ano, bem como, os elevados custos de aquisição. Neste caso, os objetivos do reúso são a redução da dependência externa de água, aumento de sua disponibilidade a fim de garantir o crescimento da região, a melhoria da qualidade da água subterrânea (através da redução da emissão de sais dissolvidos) e o controle da emissão de poluentes no mar. A primeira fase do projeto de modernização prevê a produção de 8,6 x 10⁸ m³/ano (estima-se que 1.234 m³ de água sejam suficientes para suprir as necessidades de duas famílias do condado durante um ano).

El Paso, Texas, EUA

Segundo TWRI (1990), na década de 80 a cidade de El Paso, Texas, EUA, enfrentava um dramático quadro de escassez de água e dentre as alternativas consideradas optou pela adoção do reúso indireto de água através da RAA, pois foi a melhor solução técnica-econômica encontrada.

A RAA é executada através de uma bateria de 10 poços de injeção; em operação desde 1985, que utiliza um ESTES de qualidade tal, que atende aos padrões de potabilidade federais. Estima-se que a diluição entre a água do aquífero e o ESTES seja de 20: 1 e, que a água de recarga tenha um tempo de permanência no aquífero de 2 a 7 anos.

Em 1990 o United States Geological Survey estava estudando a possibilidade de utilizar isótopos de boro e modelos computacionais para traçar a rota e o tempo de permanência do ESTES no aquífero e, se os níveis de trihalometanos podiam estar sendo elevados devido à recarga. Teoricamente El Paso poderia utilizar o reúso direto, mas a legislação estadual não permite tal prática, pois considera-se imprescindível a existência de outras barreiras que impeçam a contaminação, biológica ou química, dos consumidores. Não se tem reportado mudanças na qualidade da água do aquífero desde que a RAA foi iniciada.

Aproximadamente 9,7 x 10⁶ m³ de ESTES foi introduzido, via RAA, no aquífero em 1986 e previa-se que esse volume seria duplicado nos próximos 10 anos e, que seria responsável por 25% do suprimento de água da cidade de El Paso (2,3 x 10⁷ m³/ano em 1986). Em 1988, o custo do tratamento do esgoto e do sistema de recarga totalizava aproximadamente US\$ 0,41/m³ de água recarregada. O projeto de RAA ajudou a estabilizar o nível de água no aquífero, que baixava a uma taxa média de 0,6 m/ano antes da recarga e passou para 0,18 m/ano após o início da RAA.

Segurança sanitária e ambiental

Sabidamente a água recuperada de ESTES pode conter agentes patogênicos; tais como bactérias, enterovírus, cistos de protozoários (e.g. *Cryptosporidium*, *Giardia*) e helmintos; e químicos; elementos e compostos químicos reconhecidamente e/ou suspeitos de serem nocivos à saúde humana, e. g. não se conhece o risco à saúde de 95% dos compostos orgânicos. Em 2000 estimava-se que os EUA utilizassem 65.000 diferentes produtos químicos e que 1.000 novos produtos eram criados anualmente (LEE; JONES-LEE).

Os estudos epidemiológicos detectam com segurança somente as doenças de maior incidência, mas não prevêm uma maior incidência de doenças devido à inadequada operação das estações de tratamento de esgoto, logo, os estudos realizados em todas as localidades, apesar de concluírem que não existe risco adicional à saúde humana devido à utilização de ESTES para a RAA, ignoram que milhares de pessoas morrem ou adoecem anualmente devido ao consumo de água contaminada por contaminantes presentes no esgoto sanitário (nos EUA morrem anualmente 1.000 pessoas e aproximadamente 1 milhão adoecem anualmente devido aos inadequados padrões utilizados para avaliar a segurança dos sistemas de tratamento de esgotos). (LEE; JONES-LEE).

Estima-se que garantir um elevado nível de segurança à saúde pública e ao meio ambiente, tenha um custo de US\$ 0,05 a US\$ 0,10 /pessoa/d para os geradores e usuários de águas residuárias (LEE; JONES-LEE).

Um projeto de reúso de esgoto deve levar em conta a segurança daqueles que manipulam, armazenam, transportam e consomem a água recuperada de ESTES e, está diretamente relacionada ao uso a que se destina. É fundamental assumir um cenário realista quanto à solução ou não do problema e considerar as perdas de apoio (financeiro e público) da eventual falha do projeto.

Deve-se considerar que os projetos de RAA tem um significativo potencial para causar impactos adversos na qualidade de água do aquífero, logo, são necessários estudos e monitoração antes, durante e após a operação de RAA para definir um programa de contingência, o qual deve incluir o destino e os impactos dos contaminantes introduzidos no aquífero, o que normalmente possui um elevado custo de implantação para investimentos de curto prazo (LEE; JONES-LEE).

Segundo DILLON (1999) alguns dos riscos percebidos, associados com o armazenamento e extração de água recuperada no aquífero Bolivar (South Australia), incluía a possibilidade de:

- Crescimento ou sobrevivência de patógenos introduzidos no aquífero;
- A água injetada alcançar os poços de extração;
- Irreversível colmatação do poço ou as proximidades do aquífero;
- Crescimento de patógenos indígenas oportunistas no aquífero;
- Instabilidade do poço ou da camada saturada devido a o rebaixamento do nível de água do aquífero ou à mudanças de pressão;

- A água recuperada ter uma concentração de sais muito maior que a existente no aquífero; e
- A capacidade do aquífero não ser economicamente viável para a RAA.

Frente aos elevados riscos de contaminação ambiental e dos consumidores, é consenso, entre todos os autores consultados, que a utilização de ESTES para a RAA é uma alternativa para a obtenção de água potável, mas tal prática deve ser devidamente discutida, planejada, operada e monitorada; antes, durante e após a RAA, tornando-se imprescindíveis a utilização de barreiras adicionais para a proteção sanitária e ambiental das águas naturais presentes nos aquíferos, bem como dos consumidores. Deve ser parte integrante das medidas de salvaguarda, a avaliação dos efeitos sobre o meio ambiente e sobre a saúde humana, de forma a garantir níveis mínimos de segurança para os consumidores e ao próprio aquífero.

A utilização de ESTES que não atenda aos quesitos mínimos de qualidade; química, física, biológica e radiológica; compatíveis ao método de recarga utilizado, estará não somente provocando a contaminação do solo, das águas naturais do aquífero recarregado e dos usuários, como também estará prejudicando, ou mesmo impedindo, que essa água seja utilizada no futuro.

RAA: o surgimento de uma nova atividade econômica

A escassez de água, que gradativamente afeta os dependentes de aquíferos subterrâneos, tem levado muitas regiões do mundo a utilizar a RAA não apenas como uma forma de recompor ou elevar o nível e a qualidade da água de seus aquíferos, mas também como nova e inovadora forma de armazenamento de água.

Muitas companhias, públicas e privadas, estão adquirindo áreas para executar a RAA e futuramente vender a água armazenada. Um exemplo deste novo conceito de negócio é o da empresa Vidler Water Company, uma subsidiária da PICO Holdings, Inc, que em novembro de 1998 adquiriu do Semitropic Water Storage District, Wasco, Califórnia, $2,3 \times 10^8 \text{ m}^3$ de água subterrânea e o direito de executar a RAA e posteriormente extrair a água no distrito. O Semitropic Water Storage District é um membro participante do Kern Water Bank tem um programa de armazenamento de água subterrânea com capacidade de $1,2 \times 10^9 \text{ m}^3$ (PR NEWSWIRE, 1998).

Outro exemplo é do da The Keith Companies Inc., que em janeiro de 2002 fechou um contrato com a Inland Empire Utilities Agency, para o projeto e construção de instalações para RAA utilizando água de chuva e água importada, o sistema será composto por 47 bacias de infiltração em 19 área de recarga na área da bacia Chino, San Bernardino County, California, EUA, o valor do contrato é de US\$ 640.000 (PR NEWSWIRE, 2002).

Esses são apenas dois exemplos de novo ramo de atividade econômica que aposta na RAA como um método capaz de viabilizar a reservação subterrânea de água, e assim, assegurar ganho econômico.

Aspectos legais e institucionais da RAA

Segundo LEE; JONES-LEE nos EUA 50% da água utilizada para abastecimento humano é retirada de aquíferos subterrâneos e, mesmo neste país há carência de legislação; pois não há legislação federal que proteja a qualidade da água subterrânea e muitos estados não podem proteger seus aquíferos porque não possuem legislação específica sobre o assunto. Somente o estado da Califórnia permite o reúso de esgoto doméstico para a recarga de aquífero, sendo que o esgoto sanitário deve passar por um tratamento secundário; deve ser tratado para atender os padrões de potabilidade locais, antes de ser introduzido no aquífero (ASANO).

A inexistência de amparo legal e institucional também atingem a Austrália (DILLON), China (ZHENG) e muitos outros países que utilizam ESTES para a RAA, mas ainda não instituíram um arcabouço legal e institucional que regule o tema.

No Brasil a situação não é diferente, até porque entre nós está arraigado o conceito da fatura da água, que embora ilusória ainda persiste. Há a necessidade imediata de se discutir o reúso de água no país, inclusive da RAA, de forma que se possa estabelecer normas, desenvolver padrões e código de prática associados ao reúso. Associada ao amparo legal, há a necessidade de delegar poderes, atribuições e competências entre instituições locais e nacionais de forma a garantir seu inter-relacionamento e cooperação. Há ainda, a necessidade de definir a quem pertence o esgoto, bem como, os direitos e deveres dos produtores e usuários (HESPANHOL).

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A análise da bibliografia consultada permite concluir que a utilização de ESTES em RAA, é uma alternativa viável para a manutenção e/ou elevação do nível de aquíferos subterrâneos e para o armazenamento subterrâneo de água. Esta alternativa tem, ainda, o potencial de minimizar a escassez de água, principalmente naquelas regiões altamente dependentes de água subterrânea e, que sua utilização pode e deve ser incluída no planejamento e manejo dos recursos hídricos das regiões dependentes de aquíferos subterrâneos.

Haja visto as dúvidas que pairam sobre qual seria o impacto causado ao meio ambiente e à saúde humana, deve-se discutir amplamente o reúso com a comunidade envolvida, de forma que sejam realisticamente apresentados os benefícios e possíveis impactos decorrentes dos métodos de tratamento do esgoto e RAA propostos. A incapacidade ou impossibilidade de manter uma qualidade do ESTES constante ao longo do tempo e compatível com o método de recarga utilizado (ou que se pretenda utilizar) inviabiliza a utilização do RAA, pois torna impossível assegurar condições mínimas de segurança sanitária e ambiental à água do aquífero e à saúde de seus consumidores.

Todo o cuidado deve ser tomado no sentido de evitar a contaminação do solo e do aquífero através de projetos de RAA, pois as técnicas de descontaminação de solos e aquíferos atualmente disponíveis possuem elevado custo e tem eficiência limitada.

Finalmente, a ausência de arcabouço legal e institucional sobre o assunto não é exclusividade do Brasil, pois mesmo países que realizam a RAA há várias décadas ainda não resolveram a questão (e. g. EUA, Austrália). O tema é certamente controverso mas não pode justificar a inexistência de discussão e iniciativas de regulamentação do assunto, até porque a questão transcende a simples introdução de água recuperada de ESTES em aquíferos subterrâneos, nossas últimas fontes protegidas de água.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ASANO, T.. Groundwater recharge with reclaimed municipal wastewater - regulatory perspectives. In: Proceedings of the International Symposium on Efficient Water Use in Urban Areas - Innovative Ways of Finding Water for Cities, Kobe, Japan, 8-10 June, 1999. Disponível em: <<http://www.unep.or.jp/ietc/Publications/ReportSeries/IETCRep9/4.paper-D/4-D-asan1.asp>>. Acesso em dez. 2002.
- [2] BENNANI, A.C.; LARY, J.; NRHIRA, A.; RAZOUKI, L.; BIZE, J.; NIVault, N.. Wastewater treatment of greater Agadir (Morocco): an original solution for protecting the bay of Agadir by using the dune sands. In: Waste water management in coastal areas, March 31-April 2, 1992, Montpellier, CFRP-AGHTM, Paris, France. Apud ASANO, 1999.
- [3] BROWN, L. R.. Lençóis freáticos em declínio na China poderão brevemente causar elevação mundial nos preços dos alimentos. Worldwatch Institute, 2001. Disponível em: <<http://www.wwiuma.org.br/alerta03.html>>. Acesso em dez. 2002.
- [4] DILLON, P.. Aquifer Storage and Recovery in Urban Areas - Technology, Risks, and Implementation Issues. In: Proceedings of the International Symposium on Efficient Water Use in Urban Areas - Innovative Ways of Finding Water for Cities, Kobe, Japan, 8-10 June. Disponível em: <<http://www.unep.or.jp/ietc/Publications/ReportSeries/IETCRep9/4.paper-D/4-D-dill1.asp>>. Acesso em dez. 2002.
- [5] FOX, P.. Advantages of aquifer recharge for a sustainable water supply. In: Proceedings of the International Symposium on Efficient Water Use in Urban Areas - Innovative Ways of Finding Water for Cities, Kobe, Japan, 8-10 June, 1999. Disponível em: <<http://www.unep.or.jp/ietc/Publications/ReportSeries/IETCRep9/4.paper-D/4-D-fox1.asp>>. Acesso em dez. 2002.

- [6] HESPANHOL, I. Potencial de reúso de água no Brasil: agricultura, indústria, município e recarga de aquíferos. In: MANCUSO, P. C. S., SANTOS, H. F. (ed.). Reúso de água. São Paulo: Manole, 2002. cap. 13, p. 37-95.
- [7] KARVONEN, T. Subsurface and groundwater hydrology: basic theory and application of computational methods . Helsinki University of Technology, Laboratory of Water Resources, 2001. Disponível em: <http://ahti.hut.fi/~tkarvone/sg_h_down.htm>. Acesso em dez. 2002.
- [8] LEE, G.F.; JONES-LEE, A.. Issues in recharge of contaminated surface waters in conjunctive use projects. In: National Groundwater Association Conference Session on Conjunctive Use, San Francisco, CA, February (2000). Disponível em: <http://www.gfredlee.com/ngwa_conf_sf.pdf>. Acesso em dez. 2002.
- [9] ORANGE COUNTY WATER DISTRICT (OCWD). Groundwater replenishment system. Disponível em: <<http://www.ocwd.com/>>. Acesso em dez. 2002.
- [10] PR NESWIRE. PICO Holdings Announces Vidler Water Company Agrees to Acquire 185,000 Acre-Foot of Underground Water Storage in California. Issue: Nov, 12, 1998. Disponível em: <http://www.findarticles.com/cf_0/m4PRN/1998_Nov_12/53210906/p1/article.jhtml?term=water+recharge>. Acesso em dez. 2002.
- [11] PR NESWIRE. The Keith Companies Awarded Water Contract. Issue: Jan 14, 2002. Disponível em: <http://www.findarticles.com/cf0/m4PRN/2002_Jan_14/81774252/p1/article.jhtml?term=groundwater+recharge>. Acesso em dez. 2002.
- [12] SLOSS, E. M.; GESCHWIND, S. A.; MCCAFFREY, D. F.; RITZ, B. R.. Groundwater recharge with reclaimed water - An epidemiologic assessment in Los Angeles County, 1987-1991. Report prepared for the Water Replenishment District of Southern California - RAND, 123 p. 1996.
- [13] TEXAS WATER RESOURCES INSTITUTE (TWRI). El Paso's experience - converting wastewater into drinking water. v. 16, n.4, 1990. Disponível em: <<http://twri.tamu.edu/twripubs/WtrResrc/v16n4/text-3.html>>. Acesso em dez. 2002.
- [14] ZHENG, X.. Research and pilots program on municipal wastewater reclamation and reuse in China. The World Bank Group, 2002. Disponível em: <[http://Lnweb18.worldbank.org/ESSD/essdext.nsf/18ByDocName/ResearchandPilotProgramonMunicipalWastewaterReclamationandReuseinChina/\\$FILE/ZhengXingcanpaper.pdf](http://Lnweb18.worldbank.org/ESSD/essdext.nsf/18ByDocName/ResearchandPilotProgramonMunicipalWastewaterReclamationandReuseinChina/$FILE/ZhengXingcanpaper.pdf)>. Acesso em dez. 2002.