



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO SUL E SUDESTE DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E ENGENHARIAS
FACULDADE DE GEOLOGIA**

ANA LETICIA DA SILVA SANTOS

RECARGA ARTIFICIAL DE AQUÍFEROS: UMA REVISÃO DA LITERATURA

MARABÁ

2017

ANA LETICIA DA SILVA SANTOS

RECARGA ARTIFICIAL DE AQUÍFEROS: UMA REVISÃO DA LITERATURA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Geologia da Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará - Unifesspa, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Orientadora: Prof^a. Ma. Thulla Christina Esteves de Guzzi

MARABÁ

2017

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Biblioteca II da UNIFESSPA. CAMAR, Marabá, PA

Santos, Ana Leticia da

Recarga artificial de aquíferos: uma revisão da literatura / Ana Leticia da Santos; orientadora, Thulla Christina Esteves de Guzzi. — 2017.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Campus Universitário de Marabá, Instituto de Geociências e Engenharias, Faculdade de Geologia, Marabá, 2017.

1. Águas subterrâneas. 2. Hidrogeologia. 3. Aquíferos. 4. Bacias hidrográficas. I.Guzzi, Thulla Christina Esteves de, orient. II. Título.

CDD: 23. ed.: 551.49

ANA LETICIA DA SILVA SANTOS

RECARGA ARTIFICIAL DE AQUIFEROS: UMA REVISÃO DA LITERATURA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Geologia da Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará - Unifesspa, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

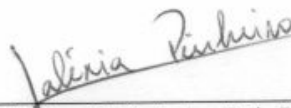
Aprovada em: 17/03/2017

Conceito: Excelente

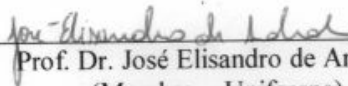
BANCA EXAMINADORA



Profª. Ma. Thulla Christina Esteves de Guzzi
(Orientadora – Unifesspa)



Profª. Drª. Ana Valéria dos Reis Pinheiro
(Membro – Unifesspa)



Prof. Dr. José Elisandro de Andrade
(Membro – Unifesspa)

MARABÁ

2017

Aos meus pais, Paulo Gilvan e Rosana.

À minha avó, Leoniza.

AGRADECIMENTOS

Com imenso prazer e sinceridade, deixo aqui registrado meus agradecimentos a todos aqueles que me auxiliaram, mesmo que de forma singela, a conclusão deste trabalho e de minha jornada acadêmica.

Meu senhor Deus, em primeiro lugar, pois sem ele não chegaria até aqui.

À minha mãe eterna, Nossa Senhora de Nazaré, que sempre intercedeu ao pai por mim em todos os momentos os quais eu roguei por sua prece.

Aos meus pais Paulo Gilvan e Rosana, por todo amor, compreensão e incentivo, acreditando no meu futuro promissor.

À minha irmã Paula Geovana, por todas as vezes que exerceu seu papel de “irmã”.

À minha orientadora Thulla, exemplo de comprometimento profissional, muito obrigada pelo apoio e conhecimento repassado.

À Unifesspa, na pessoa do corpo técnico dos professores da FAGEO, que contribuíram eximamente em todos os conhecimentos e paixão por geologia a mim adquiridos.

Aos meus amigos Bettina, Jandessa e Márcio Henrique, por serem meus companheiros de ansiedade e medo, e mais do que isso, terem tornado todos esses anos felizes.

À minha turma querida, Geologia 2012, por todos os momentos vivenciados, todas as viagens de campo, todas as vezes que estudamos juntos, e todas as vezes que fomos mais que colegas, e sim uma família, família geológica. Guardarei todos vocês pra sempre.

“A água de boa qualidade é como a saúde ou a liberdade: só tem valor quando acaba.”

Guimarães Rosa

RESUMO

O presente trabalho apresenta uma revisão da literatura sobre a Recarga Artificial de Aquíferos (RAA) e suas aplicações. A pesquisa teve como objetivo expor a RAA, quanto a sua importância e eficiência na mitigação de problemáticas referentes ao abastecimento e qualidade dos recursos hídricos subterrâneos, visto suas principais aplicações. No Brasil as problemáticas oriundas da escassez de recursos hídricos subterrâneos fazem-se presente em diversas regiões, principalmente nas regiões áridas e semi-áridas do país, caso recente exposto de forma alarmante no estado de São Paulo, onde o nível do principal conjunto de reservatórios, o sistema Cantareira atingiu cerca de 14,6% no ano de 2014, o mais baixo nível desde que foi criado em 1974. Porém, em áreas substancialmente agraciadas com a abundância de água, a problemática se dá entorno da qualidade destas, que derivam diretamente de um crescimento urbano desordenado e inerente de gerenciamentos por parte dos órgãos responsáveis, culminando em um sistema falho de fiscalização por parte dos órgãos ambientais assim como a falta de saneamento básico, o que interfere nos mananciais de forma direta caso sejam dispostos de forma incorreta. Visto isso, além de salientar a importância quanto a sua aplicação, o referido trabalho tomando posse de pesquisas realizadas no município de Marabá-PA, quanto à qualidade da água, propõe medidas mitigadoras a fim da reposição da qualidade da água subterrânea destinada ao abastecimento público. Para isso fora sugerido o desenvolvimento de um projeto piloto teórico de recarga artificial de aquíferos, onde visa à construção de poços de injeção direta e indireta, assim como a utilização da técnica de tratamento solo aquífero.

Palavras-chave: Recarga Artificial. Aquíferos. Revisão da Literatura.

ABSTRACT

The present work presents a review of the literature on the Artificial Recharge of Aquifers (RAA) and their applications. The objective of this research was to expose the RAA as to its importance and efficiency in the mitigation of problems related to the supply and quality of groundwater resources, considering its main applications. In Brazil, the problems arising from the scarcity of groundwater resources are present in several regions, especially in the arid and semi-arid regions of the country, a recent case that has been alarmingly exposed in the state of São Paulo, where the level of the main set of reservoirs, the Cantareira system reached around 14.6% in 2014, the lowest level since it was created in 1974. However, in areas that are substantially graced with the abundance of water, the problem is related to the quality of these, which derive directly from a disorderly urban growth and inherent in management by the responsible bodies, culminating in a failed system of supervision by the environmental agencies as well as the lack of basic sanitation, which interferes directly with the sources if they are incorrectly arranged. Considering this, in addition to stressing the importance of its application, this work, taking over research carried out in the municipality of Marabá-PA, in terms of water quality, proposes mitigating measures in order to restore the quality of groundwater destined to public water supply. For this, it was suggested the development of a theoretical pilot project of artificial recharge of aquifers, where it is aimed at the construction of direct and indirect injection wells, as well as the use of aquifer only treatment technique.

Keywords: Artificial Recharge. Aquifers. Review of the Literature.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Métodos comuns de infiltração de superfície.	21
Figura 2: Recarga Artificial através de bacias de infiltração (<i>infiltration pond</i>).....	22
Figura 3: Representação esquemática do processo de comaltação em bacias de recarga artificial.....	24
Figura 4: Padrões comuns de sistema de valas e canais	26
Figura 5: Método esquemático de um típico sistema de recarga por inundação.	27
Figura 6: Método esquemático de recarga artificial através do sistema de <i>Soil Aquifer Treatment</i> (SAT).	29
Figura 7: Método de recarga através de uma represa de armazenamento de areia	31
Figura 8: Método de recarga artificial através de uma represa de percolação	32
Figura 9: Esquema da distribuição, ao longo do curso do rio, de várias barreiras de retenção e infiltração, tal como proposto para a bacia do rio Girona.	33
Figura 10: Método esquemático de uma represa com zona de descarga.	34
Figura 11: Método esquemático do sistema de recarga artificial através de represas subterrâneas (<i>underground dam</i>) em leitos de rios.	34
Figura 12: Métodos comuns de infiltração subterrânea.....	35
Figura 13: Seção ilustrativa de um sistema de recarga na zona vadosa	36
Figura 14: Seção ilustrativa de recarga artificial através de trincheiras preenchidas com areia e cascalho.	37
Figura 15: Métodos de injeção direta.	39
Figura 16: Método de recarga artificial através de <i>Aquifer Storage and Recovery</i> (ASR).	41
Figura 17: Poços rasos preenchidos com material granular	44
Figura 18: Piscina termal e caixa de descarte de águas termais	45
Figura 19: Sistema de captação de águas pluviais.....	45
Figura 20: Coleta de água dos poços nas redondezas do cemitério Jardim da Saudade.	47
Figura 21: Mapa de localização dos poços contaminados no núcleo Cidade Nova,	49
Figura 22: Empreendimentos sugeridos para implantação de projeto de captação de águas pluviais.	50

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABAS- Associação Brasileira de Águas Subterrâneas

ASCE - *American Society of Civil Engineers*

ASR - *Aquifer Storage and Recovery*

IGRAC- *Internacional Ground Water Resources Assessment Centre*

RAA-Recarga Artificial de Aquíferos

SAT - *Soil Aquifer Treatment*

PRIMAZ- Programa de Integração Mineral em Municípios da Amazônia

NRC-*National Research Council*

SEWRPC-*State-of-the-art of water supply practices Report*

CGWB-*Central Ground Water Board*

PNRH- Política Nacional de Recursos Hídricos

CNRH- Conselho Nacional de Recursos Hídricos

VMP- Valores Máximos Permissíveis

SUMÁRIO

1 DISPONIBILIDADE E INSTRUMENTOS DE GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS	13
2 JUSTIFICATIVA	15
3 OBJETIVOS	15
4 METODOLOGIA.....	16
4.1 REVISÃO DA LITERATURA	16
5 REVISÃO DE LITERATURA- RECARGA ARTIFICIAL DE AQUÍFEROS.....	16
5.1 TÉCNICAS DE RECARGA ARTIFICIAL	18
5.1.1 Técnicas de recarga artificial à superfície.....	21
5.1.2 Técnicas de recarga artificial na zona vadosa	35
5.1.3 Técnicas de recarga artificial em profundidade	38
5.2 APLICABILIDADE.....	43
5.2.1 Aplicabilidade local: município de Marabá-PA	46
5.2.2 Sugestões para estudos futuros.....	50
6 CONCLUSÕES.....	51
REFERÊNCIAS	53

1 DISPONIBILIDADE E INSTRUMENTOS DE GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS

A quantidade e a qualidade das águas doces continentais no planeta sempre foram essenciais para a manutenção do ciclo da vida, a biodiversidade dos organismos e a sobrevivência da espécie humana. A quantidade de água disponível e a qualidade adequada possuem componentes que são fundamentais para a economia regional, continental e mundial, condicionando a água de boa qualidade como fator fundamental para manutenção da sustentabilidade e a saúde humanas, e em última análise a qualidade de vida de populações urbanas e rurais (TUNDISI, 2003).

No Brasil, um dos principais avanços conceituais quanto à gestão dos recursos hídricos foi a mudança de paradigma; nos últimos dez anos do século XX essa mudança se processou e ainda se encontra em fase de transição. Ela consiste em passar o gerenciamento de um sistema setorial, local e de resposta a crises e impactos, para um sistema integrado, preditivo e no âmbito de ecossistema (bacia hidrográfica. TUNDISI, 2006).

Com a implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, através da lei 9.433 de janeiro de 1997, medidas de cunho legal e institucional, com o objetivo da manutenção do equilíbrio entre a demanda e a oferta dos recursos hídricos foram estabelecidas. Entre elas cabe destaque o artigo 20, seção IV, que estabelece diretrizes para a cobrança do uso dos recursos hídricos sujeitos a outorga (HESPANHOL, 2008).

A cobrança pelo uso da água modificou substancialmente as bases operacionais e econômicas do uso da água, que embora divida opiniões entre os críticos, se constitui em um instrumento extremamente benéfico tanto em termos de conservação quanto em termos de proteção ambiental. Esta medida, porém não é suficiente para manter o equilíbrio entre a demanda e a oferta, especialmente em grandes conurbações, com perspectivas de crescimento populacional e industrial, onde as condições de disponibilidade de recursos já encontram-se insuficientes mesmo nas condições atuais (HESPANHOL, 2008).

Sabe-se que do total de água no planeta, apenas 2,7% é doce e desconsiderando as calotas polares e geleiras, 98% do volume de água doce disponível estão armazenados nos aquíferos (FETTER, 1994). 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 foram sustentados 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 à incapacidade de recarga natural de tais aquíferos (MOURA, 2004).

Os aquíferos são formações geológicas do subsolo, constituída por rochas permeáveis, que armazenam água em seus poros ou fraturas. Outro conceito refere-se à aquífero como sendo, somente, o material geológico capaz de servir de depositório e de transmissor da água ali armazenada. Assim, uma litologia só será aquífera se, além de ter seus poros saturados (cheios) de água, permitir a fácil transmissão da água armazenada (ABAS, 2016).

De acordo com Almeida (2011) em condições naturais de ocupação, com baixa impermeabilização da superfície, 5 a 50% das águas de precipitação pluvial infiltram nas zonas de recarga e alimentam os reservatórios subterrâneos de água doce, no entanto, o desequilíbrio ocasionado pela ocupação desordenada do solo, com impermeabilização de grandes áreas, aliado ao uso não controlado dos recursos naturais, comprometem consideravelmente a capacidade de infiltração do solo, contribuindo para a degradação da qualidade e diminuição da quantidade de reservas subterrâneas e aumento do escoamento das águas pluviais.

Atualmente os índices de criticidade hídrica associados à disponibilidade específica de recursos hídricos ($m^3/habitante.ano$) refletem os problemas de gestão de recursos hídricos que podem ocorrer onde a demanda começa a ser maior do que a oferta (FALKENMARK, 1992). Segundo Yassuda (1993), os demais valores das águas foram relegados como insignificantes por quase todos os departamentos públicos gestores das águas, onde passaram a ser geridos por setores dedicados à saúde pública, ao saneamento e mais recentemente por órgãos de meio ambiente, de forma fragmentária, sem organização gerencial e sem recursos financeiros adequados, e o que é pior, no pressuposto de quantidade, qualidade e outras grandezas e atributos das águas pudessem ser equacionados e gerenciados de modo dissociado, como se fossem variáveis independentes.

Perante a problemática exposta, o presente trabalho ressalta a importância da instauração de medidas alternativas à reposição da disponibilidade e qualidade dos recursos hídricos, através da técnica de recarga artificial de aquíferos (RAA), instrumento da Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), mediante resolução de nº. 153, de 17 de dezembro de 2013, que estabelece critérios e diretrizes para implantação de Recarga Artificial de Aquíferos no território Brasileiro (BRASIL, 2013).

2 JUSTIFICATIVA

Como apresentado introdutoriamente, os fatores antrópicos afetam diretamente na disponibilidade dos recursos hídricos, sejam estes por uso exacerbado e inconsciente, seja por má gestão por parte dos órgãos responsáveis, que culminam na exaustão de uma das principais fontes de abastecimento humano, os aquíferos.

Hespanhol (2002) afirma que nas regiões áridas e semi-áridas, a água se tornou um fator limitante para o desenvolvimento urbano, industrial e agrícola. Mas bem se sabe, que para além da escassez hídrica, a depredação da qualidade das águas subterrâneas tem tornado-se alarmante em diversas regiões do mundo.

Visto a dependente demanda de água subterrânea e o atual cenário ascendente de crise hídrica mundial, o referido trabalho justifica-se em apresentar e difundir soluções mitigadoras a esse quadro imposto, através da explanação por meio de revisões bibliográficas, das técnicas de Recarga Artificial de Aquíferos

3 OBJETIVOS

O principal objetivo do referido trabalho consiste em apresentar uma revisão de literatura sobre a RAA, assim como em salientar a importância do racionamento do uso dos recursos hídricos, apresentando técnicas mitigadoras a escassez dos armazenamentos de água subterrâneos destinados principalmente ao abastecimento humano.

Os objetivos específicos consistem em: a) promover a difusão sobre as técnicas de Recarga Artificial de Aquíferos de forma direta e indireta; b) apresentar a aplicabilidade das referidas técnicas segundo teses e artigos de autores renomados; c) exemplificar os métodos de forma individual, tomando posse de suas condicionantes para a instauração de um projeto de recarga artificial; d) abordar vantagens e desvantagens no uso das referidas técnicas; e) discutir sobre a melhoria da qualidade da água nos armazenamentos subterrâneos através da RAA, especificamente na cidade de Marabá, Pará; e f) contribuir para a conscientização do racionamento de água no âmbito nacional.

4 METODOLOGIA

4.1 REVISÃO DA LITERATURA

A metodologia utilizada no presente trabalho constitui-se principalmente em um levantamento bibliográfico de publicações científicas e técnicas, as quais abordam sobre a recarga artificial de aquíferos.

Tomou-se posse também de artigos de cunho científico que abordam sobre a caracterização hidrogeológica no município de Marabá-PA, assim como estudos realizados por Leal (2010) e Matos (2016) sobre a qualidade físico-química de águas coletadas em poços localizados no entorno do cemitério Jardim Saudade, no bairro Aeroporto, núcleo Cidade Nova, os quais constataram valores anômalos de potabilidade estabelecidos pela Portaria 518 da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (BRASIL, 2004).

5 REVISÃO DE LITERATURA- RECARGA ARTIFICIAL DE AQUÍFEROS

Desde a antiguidade, a utilização da água proveniente dos aquíferos é dada pelo homem, fato este que perdura de forma ascendente. Em muitas populações humanas a água oriunda dos aquíferos limita-se como única fonte de abastecimento, o que interfere diretamente no desenvolvimento social e econômico para estas regiões.

Visto a dependência do uso da água subterrânea como recurso hídrico, principalmente nas regiões áridas e semi-áridas, qualquer desenvolvimento significativo pode provocar no aquífero uma retirada excessiva, onde sob uma exploração excessiva das águas subterrâneas decorrente do aumento dos bombeamentos dos poços e da diminuição natural da reposição nos períodos secos, o nível do lençol freático pode tornar-se muito baixo por longos períodos de maneira que possa comprometer o suprimento de água de um aquífero.

Com o intuito de mitigar o esgotamento dos aquíferos através de um incremento na infiltração natural das águas superficiais para os reservatórios subterrâneos, surge à Recarga Artificial de Aquíferos, que pode ser vista como uma técnica hidrogeológica, definida na introdução de água de forma artificial para o interior de um aquífero, com o objetivo de aumentar a disponibilidade dos recursos hídricos subterrâneos e/ou de melhorar sua qualidade. Para além da recarga artificial, outros tipos de recarga podem ser designados para a

recarga de aquíferos, como as recargas naturais, facilitadas, induzidas e acidentais (DIAMANTINO, 2009).

De acordo com NRC (1994) a recarga artificial de aquíferos é o processo de espalhar ou captar a água na terra para aumentar a taxa de infiltração através do solo e percolação para o aquífero ou o processo de injeção de água por poços diretamente no aquífero.

Para Bouwer (2002) a recarga artificial de aquíferos se expressa na introdução de águas superficiais em bacias, sulcos, valas ou outras instalações onde a água possa se infiltrar no solo, recarregando os aquíferos.

Segundo Montenegro (2005) um projeto de recarga artificial pode ser visto como o processo em que o excesso de água superficial é direcionado para o subsolo, seja por infiltração, seja por injeção através de poços, com o objetivo específico de recarregar um aquífero.

De acordo com SEWRPC (2006) a recarga artificial é definida como qualquer sistema projetado para introduzir e armazenar água em um aquífero.

A recarga artificial também pode ser definida como um processo de reabastecimento induzido do reservatório de água subterrânea por atividades humanas. O processo de suplementação pode ser planejado, tal como armazenar água em poços, tanques, ou outras estruturas, para alimentar o aquífero, ou pode ser não planejado, de forma incidental, como os processos de irrigação aplicada, vazamentos de tubos, dentre outros (CGWB, 2007).

Segundo Pyne (1994) e Asano (1999) os principais objetivos do uso da recarga artificial de aquíferos são: a) manutenção ou elevação do nível de água no aquífero; b) diminuição e controle de problemas de intrusão salina em aquíferos costeiros; c) controle de subsidência de solos; d) controle de inundações; e e) armazenamento subterrâneo de água seja este de origem fluvial, pluvial ou recuperada de efluentes de sistema de tratamento de esgoto sanitário (ESTES).

Consoante CGWB (2007) a recarga artificial de aquíferos possui as seguintes vantagens: a) o espaço de armazenamento no subsolo está disponível gratuitamente e a inundação é evitada; b) as perdas por evaporação são insignificantes; c) melhoria da qualidade por infiltração através dos meios permeáveis; d) pureza biológica elevada; e) não possui impactos sociais adversos como deslocamento da população, perdas de terras agrícolas, etc; f) as variações de temperatura são mínimas; g) controle de erosão dos solos e inundações, e fornece umidade suficiente para o solo durante os meses de verão; e h) fornece um sistema de distribuição natural entre os pontos de recarga e descarga.

5.1 TÉCNICAS DE RECARGA ARTIFICIAL

Para a instauração de um projeto de recarga artificial de aquíferos, dispõe-se de uma gama de técnicas que podem ser aplicadas, estas dependentes do tipo de recarga, se direta ou indireta.

De acordo com Diamantino (2009) os métodos que utilizam a recarga direta são aqueles em que a recarga é aplicada diretamente no volume no aquífero, sendo esta mais adequada à aquíferos freáticos; já a recarga indireta consiste nos métodos de recarga que aumentam a taxa de infiltração do solo, através do aumento do gradiente hidráulico em direção ao aquífero. Segundo Asano (1985) as técnicas indiretas de recarga artificial envolvem bombeamentos de aquíferos para reduzir o nível de água, induzindo então a recarga pelo aumento do gradiente hidráulico e a modificação de aquíferos para aumentar o gradiente ou a criação de reservatórios subterrâneos.

Para Asano (1985) e O'Hare *et al.* (1986) os métodos utilizados para RAA dividem-se em métodos diretos superficiais, métodos diretos subsuperficiais, combinação de métodos superficiais e subsuperficiais e métodos indiretos. Os métodos diretos superficiais consistem nas bacias de infiltração, inundação de grandes áreas (*flooding*), sistemas de valas, modificação do canal de rios, aumento do fluxo de rios e sobre-irrigação. Os métodos diretos subsuperficiais incluem poços injetores, drenagem reversa e fendas naturais. Já o método de combinação de técnicas superficiais e subsuperficiais abrangem técnicas de drenagem superficial (coletadas em poços) e bacias com poços. Por fim o método indireto inclui recargas induzidas das fontes superficiais por ações no aquífero, criando um gradiente em direção ao mesmo.

Para Kumar e Fall (1997) os métodos de recarga artificial de aquíferos se subdividem em métodos diretos e métodos indiretos. Os primeiros incluem bacias de alagamento, poços e depressões de recarga, valas e furos de recarga, já os métodos indiretos de recarga englobam infiltração induzida em leitos de rios e furos conjuntivos.

Díaz *et al.* (2000) divide os métodos de recarga em métodos de recarga à superfície, subdivididos em aplicáveis ou não a leitos de rios, e em métodos profundos. Os métodos superficiais aplicáveis a leito de rios incluem sarjas, canais permeáveis e represas, os métodos superficiais não aplicáveis a leitos de rios compreendem as balsas, valas, os canais e os terrenos de extensão. Os métodos de recarga em profundidade incluem os furos de injeção, as grandes cavidades profundas no solo, os drenos e galerias e as valas e sondagens.

Consoante Bouwer (2002) os métodos de recarga artificial de aquíferos são divididos em quatro tipos: 1) método de infiltração superficial, aplicáveis em leitos ou não; 2) infiltração na zona não saturada; 3) furos; e 4) sistemas de recarga combinados.

De acordo com Gale *et al.* (2002) os métodos de recarga podem ser efetuados à superfície do solo, nas zonas não saturadas ou diretamente no aquífero, dispondo-se assim nas seguintes classes: 1) métodos de alagamento à superfície; 2) poços e furos abertos; 3) furos e sondagens; 4) barreira de infiltração; 5) represas de armazenamento de areia; e 6) recolha de água da chuva em telhados.

Segundo CGWB (2007) as técnicas de recarga podem ser divididas em métodos diretos, indiretos e combinação de ambos os métodos. Os métodos diretos são subdivididos em técnicas de espalhamento de superfície, que compreendem as bacias de espalhamento, valas e sulcos, bacias de recarga, estruturas de conservação de escoamento e modificação no fluxo. Já as técnicas de subsuperfície compreendem poços de injeção, poços de recarga por gravidade e recarga através de *pits e shafts*. Os métodos indiretos são divididos em recargas induzidas através de águas superficiais e modificação em aquíferos.

Diamantino (2009) classifica em termos gerais os métodos de recarga artificial no seguinte modo: 1) métodos de recarga artificial à superfície, aplicáveis ou não a leito de rios; 2) métodos de recarga artificial na zona não saturada; e 3) métodos de recarga artificial em profundidade. Os métodos de recarga artificial não aplicáveis em leito de rios incluem bacias de infiltração, represas perenes, valas e canais, recarga por alagamento e por irrigação; já os métodos de recarga artificial à superfície executáveis em leitos de rios incluem as represas de armazenamento de areia e modificação no canal de um rio. Os métodos de recarga em zonas não saturadas compreendem os poços na zona não saturada, as trincheiras de infiltração e os aquíferos artificiais. Os métodos de recarga em profundidade englobam os poços de injeção, os poços de armazenamento subterrâneo e extração e os poços conjuntivos.

Este trabalho aborda principalmente as técnicas de RAA consoante as seguintes referências: Diamantino (2009), Gale *et al.* (2002), Bouwer (2002), Díaz *et al.* (2000), Gale e Dillon (2005), CGWB (2007), NRC (1994) e SEWRPC (2006).

Para a implementação de uma referida técnica em um projeto de recarga artificial, as escolhas devem ser analisadas de forma que reúnam características do meio onde se pretende aplicar o método em questão, considerando as nuances de cada método em particular, seja ele aplicado em profundidade ou em superfície. Díaz *et al.* (2000) destaca de forma genérica alguns fatores e aspectos que devem ser considerados na designação de um determinado tipo de método, os quais são resumidos na Tabela 1.

Tabela 1: Vantagens e desvantagens dos métodos de recarga artificial.

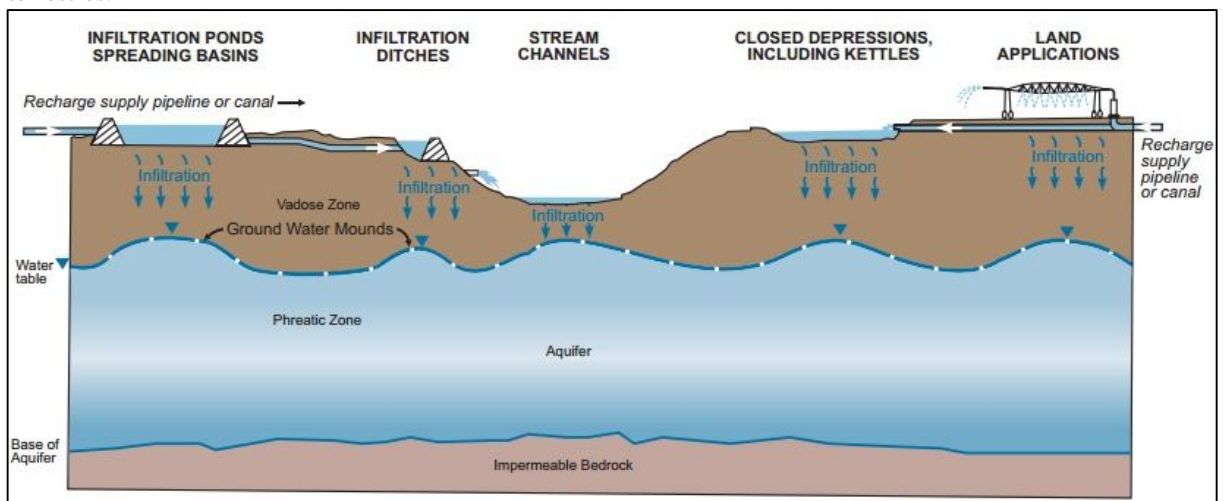
FATORES	MÉTODOS	
	SUPERFICIAIS	PROFUNDOS
Preço e disponibilidade do terreno	Custo de terreno elevado, devido à necessidade de grandes áreas de infiltração	Baixo custo e necessidade de pouco espaço
Fatores estéticos e ambientais	Podem apresentar problemas de proliferação de roedores e insetos. Requerem cercas e valas para proteger os animais e as pessoas	Escasso
Permeabilidade do aquífero	Média a grande, onde baixas permeabilidades exigem terrenos de grande extensão para poder recarregar volumes considerados de água	Variável. Empregados quando existe a alternância de níveis permeáveis/impermeáveis ou quando existe níveis pouco permeáveis entre a superfície do solo e o aquífero
Construção de instalações	Podem requerer terrenos para a construção de algumas instalações, como, por exemplo, transporte de água, podendo tornar o sistema muito complexo	Não exige sistemas complicados
Volume de recarga	Podem ser extensos	Notavelmente inferior quando comparada com instalações superficiais
Perdas por evapotranspiração	Em alguns casos podem ser importantes, dependendo do tamanho das instalações	Nulas
Requisitos de qualidade da água	Pequeno, uma vez que pode aproveitar o poder auto depurador da zona não saturada	Grande, uma vez que a água é introduzida diretamente no aquífero. Às vezes implicam em um custo de pré-tratamento significativo
Comaltação	Os problemas derivados da comaltação podem ser significativos. Água introduzida deve apresentar baixo conteúdo de sólidos em suspensão	Apresenta grande suscetibilidade de comaltação
Depuração da água pelo solo	Grande. A passagem de água em meio não saturado é decisiva para se conseguir uma boa eliminação dos contaminantes	Pouca ou nula

Fonte: Modificado de Díaz *et al.* (2000).

5.1.1 Técnicas de recarga artificial à superfície

Os métodos de recarga artificial à superfície consistem em suma em permitir a infiltração da água através de uma extensa superfície de contato entre a água e o solo. Estes tipos de recargas são frequentemente utilizados em aquíferos freáticos, visto que estes não possuem níveis de baixa permeabilidade à superfície ou na zona não saturada (DÍAZ *et al.*, 2000). De acordo com SEWRPC (2006), os métodos de recarga artificial à superfície (figura 1) requerem locais com solos permeáveis, topografia adequada, e um aquífero que possua permeabilidade suficiente e extensão lateral para aceitar a água sem construir um grande montículo subterrâneo que impeça uma infiltração adicional.

Figura 1: Métodos comuns de infiltração de superfície, onde incluem tanques de infiltração e bacias de espalhamento, valas de infiltração, canais de água, depressões fechadas, incluindo chaleiras e aplicações terrestres.



Fonte: SEWRPC (2006).

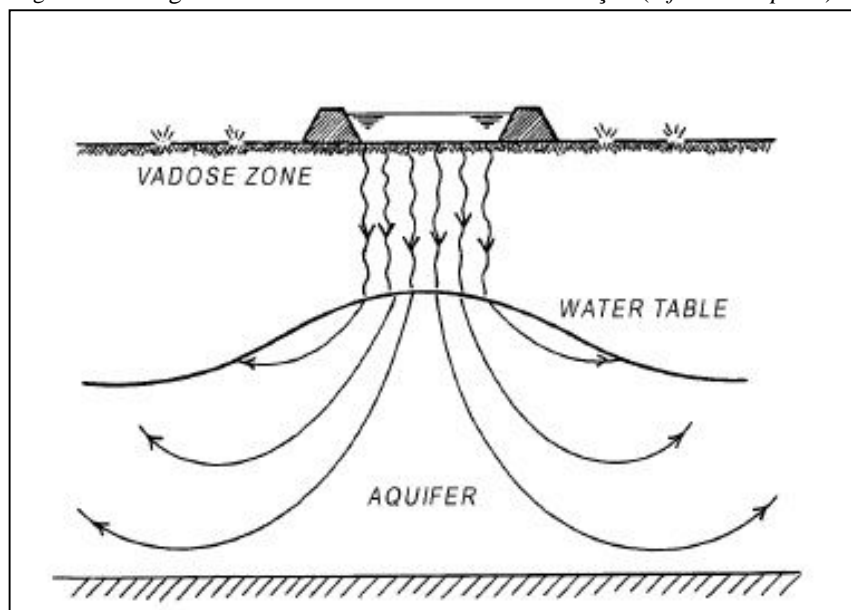
Díaz *et al.* (2000) em termos gerais qualifica os métodos de recarga artificial à superfície, em detrimento àqueles realizados em profundidade, visto que os métodos aplicados em superfície apresentam complicações técnicas inferiores, como baixo custo de execução, manutenção e operação. Os métodos de recarga artificial à superfície mais comuns serão descritos nos subtópicos seguintes, segundo Diamantino (2009). De acordo com esta referência, estes podem ser aplicáveis ou não a leitos de rios, onde os que se descrevem em seguida são aqueles implementados fora do leito dos rios.

- **Bacias de infiltração**

Este é o método mais simples, antigo e amplamente utilizado para executar a RAA, pois se baseia na simples infiltração da água destinada à recarga. Este método necessita da descarga de água em bacias escavadas no solo para este efeito (figura 2), tornando-se preferível por permitir o uso eficiente do espaço e requerer uma manutenção simples e rápida, sendo sua utilização indicada para áreas que disponham dos seguintes aspectos: a) a disponibilidade de uma área de solo permeável; b) a presença de uma zona não saturada sem camadas impermeáveis; c) a presença de um aquífero freático; d) a ausência de zonas contaminadas na zona não saturada e no aquífero; e e) a manutenção de um nível de água sob estes solos (BOUWER, 1996).

De acordo com Gale *et al.* (2002), a profundidade da bacia deve ser rasa o suficiente, para permitir a rápida drenagem caso onde a limpeza da bacia por secagem ou raspagem seja necessária. Por outro lado, o fundo deve ser grande o suficiente para evitar a penetração profunda da luz solar que resultaria no crescimento de raízes aquáticas e consequente resistência ao fluxo lateral de água. Para as bacias de infiltração, grandes áreas de terra devem ser disponibilizadas, e o método proporciona taxas relativamente baixas por unidade de área utilizada (O'HARE *et al.*, 1986).

Figura 2: Recarga Artificial através de bacias de infiltração (*infiltration pond*).



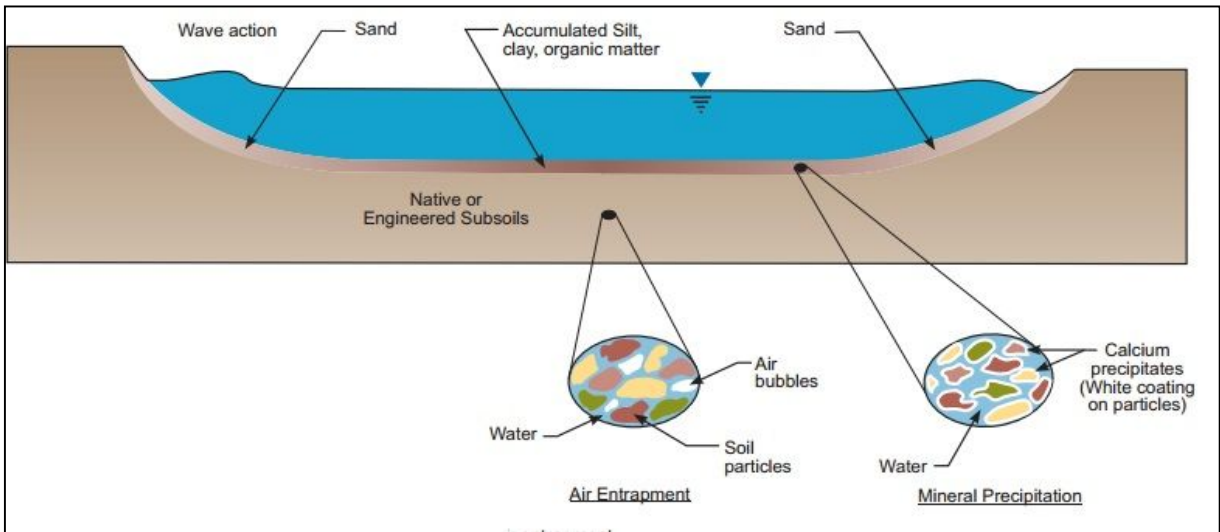
Fonte: Bouwer (2002).

Para Kumar e Fall (1997), três são os fatores que interferem na quantidade de água que infiltra em um processo de descarga direta no solo: 1) taxa de infiltração; 2) taxa de percolação; e 3) a capacidade para fluxo horizontal da água. Em casos onde a taxa de infiltração é realizada durante todo o ano, uma taxa em média de 30 m/ano (0,8 m/dia) pode ser obtida para solos de textura fina, como margas arenosas, 100 m/ano (0,27 m/dia) para solos margosos, 300 m/ano (0,82 m/dia) para areias limpas médias e 500 m/ano (1,37 m/dia) para areias grossas limpas (BOUWER, 2002).

Além das taxas de infiltração, o processo de evaporação que ocorre nas bacias de infiltração comporta-se como fator limitante, visto que em superfícies abertas as taxas de evaporação são em média de 0,4 m/ano para climas frios e úmidos e 2,4m/ano para climas quentes e secos. Quando a fonte de água proveniente do fluxo sazonal é esporádica e contém uma recarga elevada de sólidos suspensos, torna-se necessário um controle da estrutura de recarga bastante eficiente, a fim da manutenção das taxas de infiltração e a redução para um valor mínimo das taxas de evaporação (GALE *et al.*, 2002).

Como previamente citado, os sólidos em suspensão na água destinada a recarga comportam-se como uma problemática do ponto de vista técnico, pois ocasionam a comaltação, que se entende pelo processo de acumulação de materiais sobre a superfície de infiltração da água, ocasionando na redução da capacidade de recarga (figura 3). A comaltação pode ser resultado de efeitos mecânicos, atividades biológicas e processos químicos. O processo de comaltação mecânica ocorre quando as partículas transportadas por suspensão por uma corrente de água em uma determinada velocidade sofrem um decréscimo na velocidade, para o mesmo tamanho de partícula permitindo assim a deposição do material. Já a comaltação por atividade biológica é resultado do crescimento de algas e plantas, em uma água que contém uma relativa quantidade de matéria orgânica, geralmente em épocas do ano de grande luminosidade e elevada temperatura, como o verão. A comaltação química é resultado de possíveis reações de dissolução, precipitação, troca iônica, absorção, adsorção e processos de oxidação e redução (DÍAZ *et al.*, 2000).

Figura 3: Representação esquemática do processo de comaltação em bacias de recarga artificial.



Fonte: SEWRPC (2006).

Alguns procedimentos podem ser realizados para a mitigação do processo de comaltação, onde as principais ações de caráter preventivo, que se empregam para evitar ou reduzir os efeitos segundo Díaz *et al.* (2000) são: a) decantação de materiais em suspensão na água de injeção ou de infiltração por bacias destinadas para este fim; b) filtração da água de recarga através de um filtro de areia ou cascalho, colocando-os no fundo da bacia ou em um circuito exterior através das sondas de injeção; c) emprego de pesticidas que podem ser contra-indicados, já que degradam a qualidade da água, com maior ou menor intensidade, dificultando posteriores processos de autopurificação; d) aumento da altura da lâmina d'água, a fim da diminuição da intensidade luminosa e como consequência, impedir o desenvolvimento de algas; e) modificação do sistema de recarga, mudando as bacias por canais, visto que grande parte das algas que se desenvolvem nestas, são espécies que vivem em remanso ;e f) alimentação intermitente das bacias, o que abranda o desenvolvimento de algas por esvaziamentos frequentes, e evita a comaltação devido ao inchamento das argilas.

Apesar dos possíveis fenômenos de comaltação, Asano (1985) atribui quatro vantagens ao uso das bacias de infiltração: 1) as taxas de infiltração desejadas podem ser obtidas construindo-se bacias de dimensões apropriadas; 2) águas de chuvas intensas podem ser armazenadas para posterior infiltração; 3) os depósitos de sujeira podem ser diminuídos através de técnicas de construção da bacia, ou procedimentos operacionais; e 4) o terreno é utilizado eficientemente.

- **Represas perenes**

As represas semi-perenes ou perenes reúnem elevadas quantidades de água e profundidade, que podem ser usadas tanto como fonte de água para irrigação direta, quanto para recarga de água subterrânea. As sucessivas deposições de silte nos processos de descarga de água conduzem a uma redução na eficiência da estrutura de recarga, visto que o nível piezométrico resultante da acumulação de vários metros de água força os sedimentos finos a se depositarem na superfície da represa, compactando-os, restringindo assim a efetividade deste sistema (GALE *et al.*, 2002).

Neste tipo de técnica ressalta-se também a elevada taxa de evaporação, visto que se trata de uma estrutura aberta, porém as estimativas da importância desta perda não são facilmente obtidas. Todos estes fatores devem ser apreciados e, se possível, quantificados para garantir que as represas sejam geridas como estruturas de recarga ou de armazenamento. Um bom entendimento do desempenho hidráulico das estruturas permitirá esclarecer as diferentes expectativas das partes interessadas (GALE *et al.*, 2002).

- **Valas e canais**

As valas são estruturas que devem possuir inclinação adequada para a manutenção da velocidade de fluxo e mínima deposição de sedimentos. As larguras das valas são tipicamente de 0,30 m a 1,80 m (CGWB, 2007).

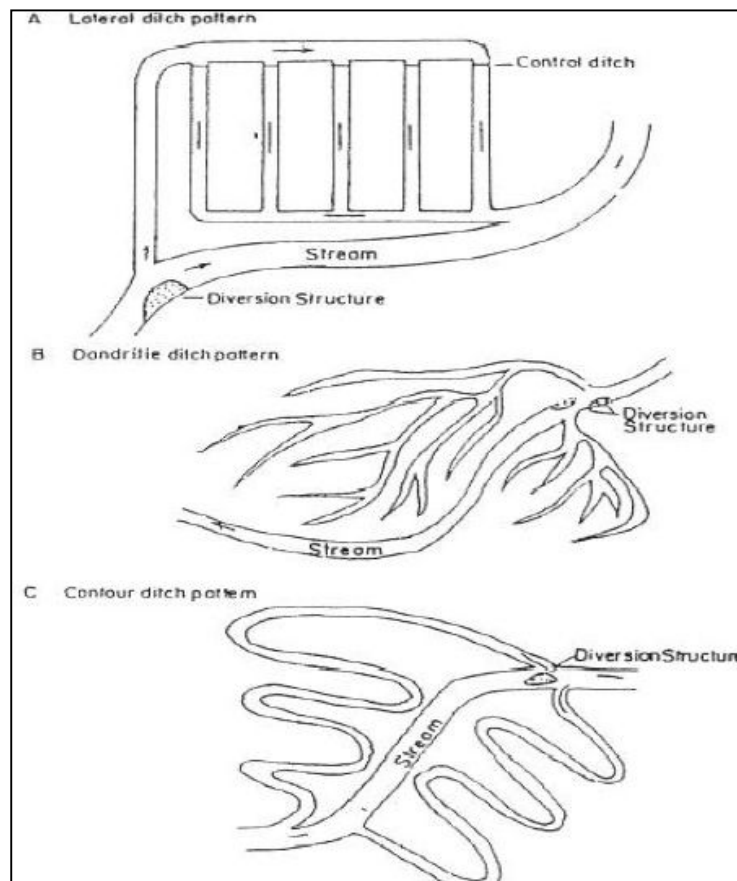
De acordo com Gale *et al.* (2000), estas instalações consistem em uma série de valas ou canais espaçados e achatados, de forma a obter uma maior área de contato com a água, favorecendo assim a infiltração. Existem diversas formas para este sistema, mas comumente consiste em um canal principal que se ramifica em canais menores e valas, com uma vala de coleta no fim do sistema, com finalidade de transmitir o excesso de água novamente para o canal principal, onde o gradiente do canal principal deve ser suficiente para transportar o material em suspensão rapidamente, a fim de evitar a comaltação no sistema.

Para Díaz *et al.* (2000), as valas são sistemas alongados, com baixa profundidade e de grande extensão, nos quais as superfícies laterais admitem papel principal em detrimento ao fundo destas instalações, visto que a infiltração nestas ocorre preferencialmente pelos flancos. Este autor refere-se ainda aos canais, classificando-os como pouco profundos, os

quais acompanham a topografia do terreno onde o processo de infiltração pode ocorrer tanto pelos flancos da estrutura como também pelo fundo.

Para Asano (1985) e O'Hare *et al.* (1986) as valas podem terminar em um conjunto de drenos superficiais com a função de retirar a água que não infiltra a fim de evitar acumulações e reduzir a sedimentação de finos, podendo a recarga ser realizada utilizando água com grande quantidade de sólidos suspensos, visto que o fluxo geralmente é suficiente para carrear os sólidos de volta ao leito do rio. A figura 4 apresenta alguns exemplos de sistema de valas.

Figura 4: Padrões comuns de sistema de valas e canais: a) valas dispostas lateralmente; b) valas dispostas em sistema dendrítico; c) padrão de valas de contorno.



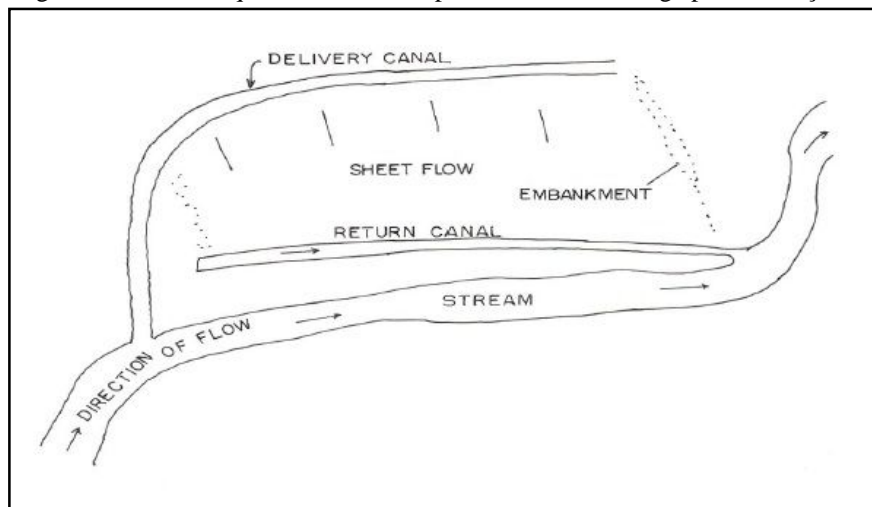
Fonte: CGWB (2007).

- **Recarga por alagamento**

Esta técnica é ideal para regiões adjacentes a rios ou canais de irrigação em que os níveis de água permaneçam profundos mesmo após as monções e onde o abastecimento de

água superficial disponível não esteja comprometido. O esquema de um típico sistema de recarga por inundação está representado na figura 5, onde para garantir o tempo adequado de contato e a dispersão de água, são proporcionados aterros em dois lados para guiar a água da superfície não utilizada, para um canal de retorno que transporta o excesso de água do fluxo para um canal (CGWB, 2007).

Figura 5: Método esquemático de um típico sistema de recarga por inundação.



Fonte: CGWB (2007).

A fim de mitigar possíveis processos de inundação neste método, toda a planície deve ser cercada por valas, visto que a preparação do terreno para este tipo de sistema é mínima, pois a recarga por alagamento é menos custosa quando comparado a outros sistemas, porém é necessária uma grande área de terreno para o desenvolvimento destas operações de recarga, de acordo com Gale *et al.* (2002). Por outro lado uma importante carga de sedimentos pode ser transportada pela água e depositar-se na superfície do solo, afetando, portanto as taxas de infiltração, onde os maiores índices destas são observados em áreas com vegetação e solos não perturbados (TODD, 1959).

- **Recarga por irrigação**

Os regimes de irrigação são frequentemente uma fonte importante de recarga não intencional para os aquíferos. Por exemplo, em áreas áridas e semi-áridas onde a percolação

profunda é confiada à lixiviação de sais a partir da zona das raízes das plantas, a intenção não é recarregar os aquíferos, onde o resultado líquido pode ser recarregar com água de má qualidade, levando a níveis crescentes de água subterrânea e a extração de água (GALE *et al.*, 2002).

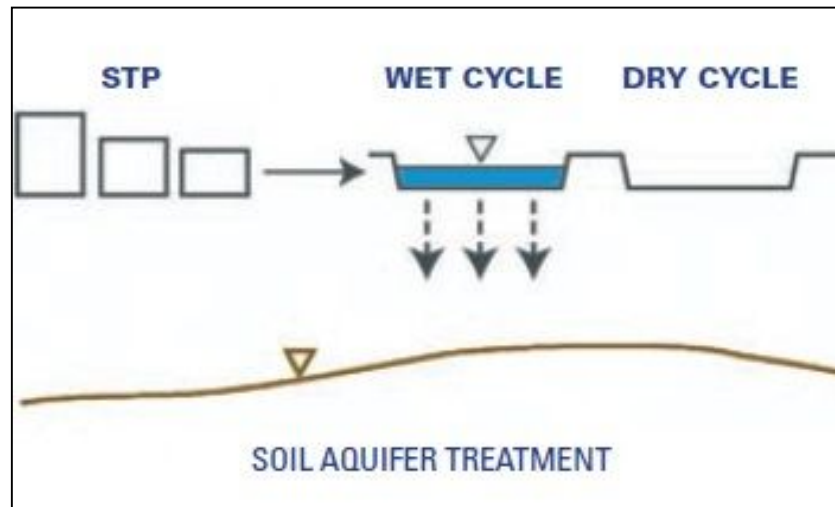
Para Israelson (1950), o método de recarga por irrigação é similar a outros métodos, como por exemplo, o de inundação, onde o método de irrigação é indicado nos casos em que há um excesso de água superficial. Díaz *et al.* (2000) nomeia um sistema de recarga semelhante ao de irrigação por “terrenos extensos”, que traduz-se na descarga de água em uma grande superfície do terreno.

Como um sistema de distribuição já está em vigor, nenhum custo adicional para a preparação da terra é necessário. A irrigação é, no entanto, muitas vezes realizada em planícies onde o lençol freático está em águas rasas. Isto implica pouco volume disponível para o armazenamento de água e é frequentemente o caso que as medidas devem ser tomadas para evitar o registro da água, através de canais de drenagem. Mesmo quando os níveis de água subterrânea forem originalmente encontrados em profundidade considerável, a percolação profunda de água aplicada aos sais de lixiviação da zona radicular, pode resultar em lençóis freáticos acima da profundidade superficial, onde requerem controle e manejo. A qualidade da água sob as áreas irrigadas também precisa ser cuidadosamente avaliada, pois pode conter concentrações inaceitáveis de sal lixiviado, assim como de produtos químicos agrícolas (GALE *et al.*, 2002).

- **Reutilização de águas residuais tratadas**

Onde as águas residuais tratadas ou o escoamento de águas pluviais são utilizados em sistemas de infiltração na superfície, a zona vadosa e em alguns casos o aquífero atuam como filtros naturais e lentos que tipicamente reduzem a concentração de vários poluentes, devido a processos físicos, químicos e microbiológicos. Os sólidos em suspensão são filtrados; compostos orgânicos são decompostos; microrganismos são adsorvidos, esticados ou morrem devido à competição com outros microrganismos do solo; as concentrações de azoto são reduzidas por desnitrificação; os compostos orgânicos sintéticos são adsorvidos e/ou biodegradados; e o fósforo, flúor e metais pesados são adsorvidos, precipitados ou de outro modo imobilizados. Assim, o tratamento solo-aquífero (figura 6) pode ser um passo importante no trem de tratamento para a reutilização de águas residuais (NRC, 1994).

Figura 6: Método esquemático de recarga artificial através do sistema de *Soil Aquifer Treatment* (SAT).



Fonte: Gale e Dillon (2005).

A técnica conhecida mundialmente como *Soil Aquifer Treatment* (SAT), tem tornado-se uma fonte e uma forma de recarga de aquíferos a considerar (DIAMANTINO, 2009). A maioria dos processos de tratamento solo-aquífero ocorre na parte superior da zona vadosa, onde os solos geralmente são mais finos e têm um maior teor de matéria orgânica do que no aquífero, o fluxo é insaturado e os níveis de oxigênio variam de aeróbia a anaeróbia (NRC, 1994).

Os sistemas de infiltração para recarga artificial de água subterrânea ou sistemas SAT para tratamento e armazenamento de águas de qualidade deterioradas devem ser adaptados à hidrogeologia local, à qualidade da água de entrada e ao clima. Em geral, as profundidades da água da bacia devem ser inferiores a 30 cm, e as bacias devem ser hidraulicamente independentes para que cada uma possa ser inundada, seca e limpa de acordo com sua melhor programação. As estruturas de entrada não devem causar erosão do solo que possa obstruir os fundos da bacia. Os períodos de secagem devem ser iniciados antes que as taxas de infiltração tenham atingido valores baixos, de modo que a secagem pode ser obtida por infiltração natural e não é necessário bombear ou drenar as bacias (NRC, 1994).

Deve haver também um número suficientemente grande de bacias para permitir uma operação flexível (ciclos variáveis de inundação, secagem e limpeza), com algumas bacias em reserva para manejar fluxos ou fluxos máximos de água durante períodos de baixas taxas de infiltração. As taxas podem ser baixas, por exemplo, no inverno, quando a água está fria, a

secagem é lenta e a recuperação da infiltração é incompleta, ou no verão, quando as algas e os biofilmes de fundo crescem mais rapidamente (NRC, 1994).

Onde não há experiência local com recarga artificial, são necessárias investigações adequadas do local e experimentação local com um projeto piloto ou de teste, especialmente se a água de fonte é tratada com águas residuais municipais ou água de baixa qualidade. Os resultados de tais projetos-piloto são então utilizados para desenvolver critérios de concepção e gestão para o bom desempenho destes sistemas. Para proteger a água subterrânea nativa de alta qualidade e poços de água potável próximos contra a invasão por água derivada de esgoto ou água de recarga de outra qualidade prejudicada, os sistemas normalmente são projetados como sistemas de recuperação de recarga, onde toda a água de recarga é retirada do aquífero novamente com poços, drenos ou outros interceptores estrategicamente localizados (NRC, 1994).

Os métodos de recarga artificial à superfície implementados no leito dos rios são descritos a seguir.

- **Represas de armazenamento de areia**

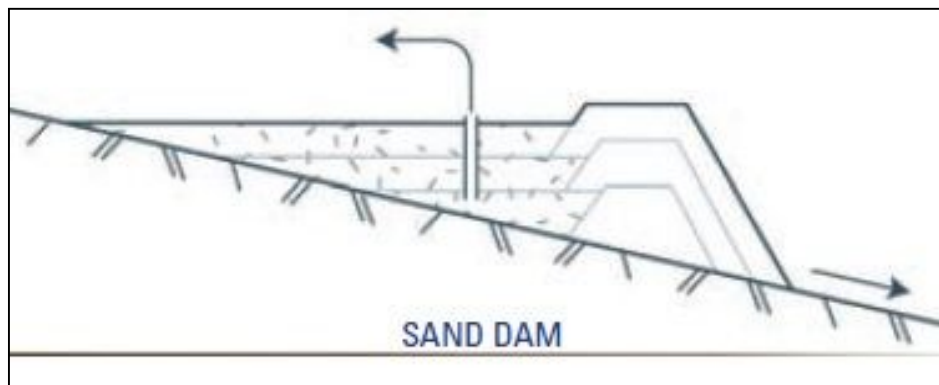
De acordo com Gale e Dillon (2005), os métodos de recarga artificial através de represas de armazenamento de areia são mais apropriados em locais de terreno irregular e em condições climáticas áridas, onde o escoamento superficial ocorra normalmente, sob a forma de cheia. As represas contam com uma estrutura construída com areia, em rios efêmeros e vales bem definidos, onde a parede da represa é construída de acordo com a largura do leito do rio, de modo a abrandar as águas de cheias ou de eventos de escoamento temporário (figura 7). Este processo permite a deposição do material mais grosseiro e a sua acumulação por detrás da parede da represa artificial, sendo esta submetida a possíveis soerguimentos após cada evento de cheia, sendo sua altura determinante no volume do escoamento e da quantidade de material acumulado.

Com o tempo, os sucessivos eventos de escoamento resultam na construção de um aquífero artificial, que permite a infiltração da água, ao invés do seu escoamento natural pelo rio, onde a água armazenada fica, portanto disponível para extração. Quando estas represas são construídas sobre materiais permeáveis, a água acumulada acaba também por recarregar o aquífero subjacente (GALE e DILLON, 2005).

Para Díaz *et al.* (2000) as represas são um tipo de sistema de recarga formado por diques ou por muros de terra em formato de “L”, as quais permitem aumentar o tempo e a superfície de contato entre a água e o terreno. Os canais permeáveis constituem represas artificiais de um rio cujas zonas de fecho não são totalmente impermeáveis, já as sarjas consistem essencialmente na escarificação do leito do rio eliminando os sedimentos finos e melhorando a infiltração da água nestes locais.

Conforme a estruturas semelhantes, às represas de areia apresentam problemáticas quanto ao processo de comaltação do sistema, resultante da deposição de materiais de granulometria fina. De acordo com Gale *et al.* (2000), estas situações podem ser mitigadas segundo dois aspectos a seguir: 1) em períodos de baixa intensidade de escoamento superficial, a água deve passar por uma abertura na parede da represa com uma velocidade suficiente, de modo a manter as partículas finas em suspensão; e 2) viabilizar a construção de bacias de acumulação de silte a montante da represa que permitam a sua deposição prévia.

Figura 7: Método esquemático de recarga através de uma represa de armazenamento de areia (*sand dam*) instituída no leito de rios.



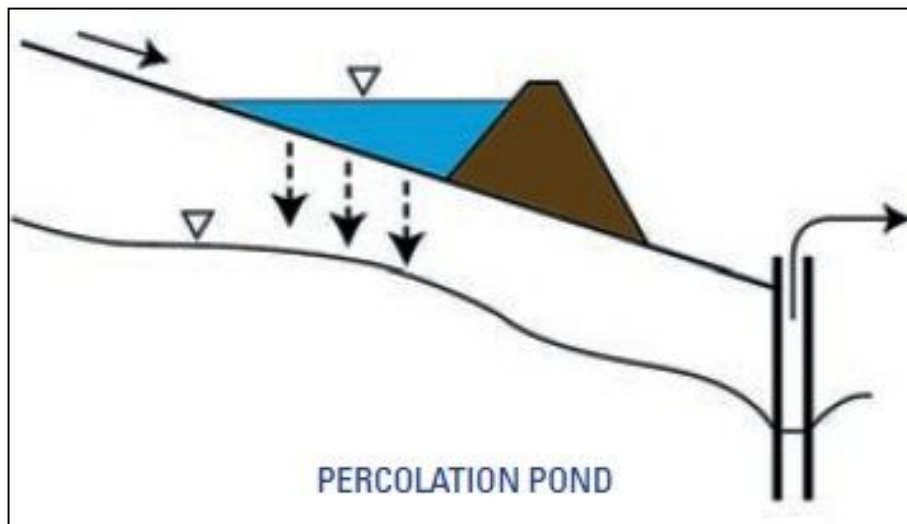
Fonte: Gale e Dillon (2005).

- **Modificação no canal de um rio**

A construção de barreiras ou de represas no leito do rio, com o intuito de reabastecer os aquíferos apresenta-se de forma econômica quando comparada com outros tipos de técnicas em projetos de RAA (figura 8). Para remediar os processos de erosão anual ou a destruição destas estruturas, é necessária por vezes a construção de um vertedouro em cimento. Para conter e canalizar estas águas de escoamento superficial é necessário também a construção de barreiras extensivas, onde estas quando construídas em série, retardam a energia do escoamento de água no rio durante os episódios torrenciais, e possibilitam que esta

água se infiltre no solo, assim como permitem a redução na erosão do solo e o transporte de sedimentos (GALE e DILLON, 2005).

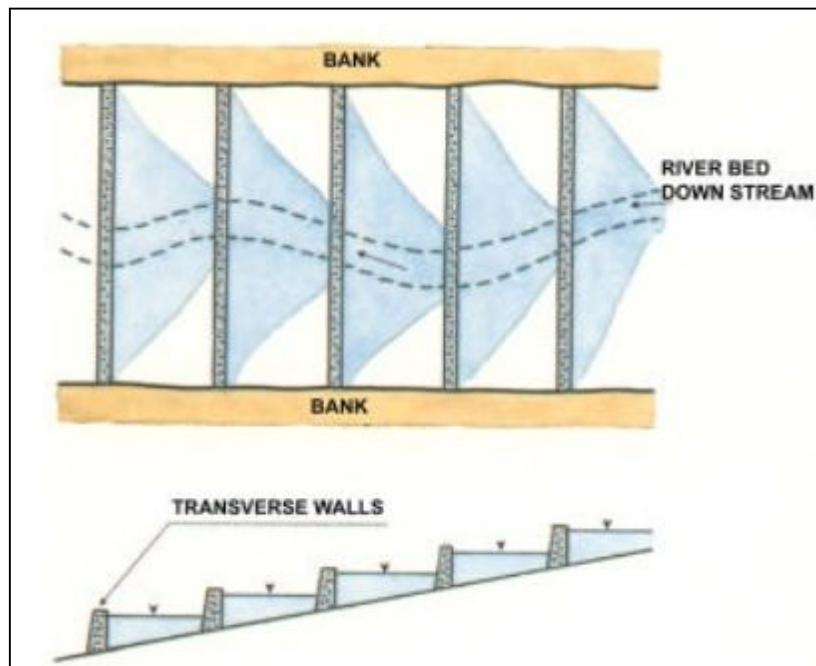
Figura 8: Método esquemático de recarga artificial através de uma pequena represa de percolação (*percolation pond*) a montante, no leito de um rio.



Fonte: Gale e Dillon (2005).

Na província de Alicante, Espanha, Cachero *et al.* (2001) propôs um projeto de recarga artificial utilizando a referida técnica. A instalação de recarga proposta se baseava na infiltração de água através do leito do rio Girona, por meio de estruturas de retenção situadas no próprio leito do rio. Estas estruturas consistiam, basicamente, em diques, com uma altura de um a dois metros e uma largura igual a do leito do rio. Para determinar o número de diques necessários, realizou-se um estudo topográfico do perfil do rio e determinou-se a permeabilidade do leito do mesmo, onde se concluiu que no total 13 diques poderiam ser construídos rio abaixo da barragem de Isbert, com uma distribuição como mostrado na figura 9. A instalação proposta teria uma capacidade de retenção de água de algo mais de 70.000 m³, sendo o volume retido por cada dique de 1.100 a 7.700 m³. A análise mostra que a instalação poderia infiltrar, ao longo de dez anos, um pouco mais de 18 hm³ de água (com uma média de 1,82 hm³/ano), o que representaria 21% do excedente total de água disponível.

Figura 9: Esquema da distribuição, ao longo do curso do rio, de várias barreiras de retenção e infiltração, tal como proposto para a bacia do rio Girona.



Fonte: Cachero *et al.* (2001).

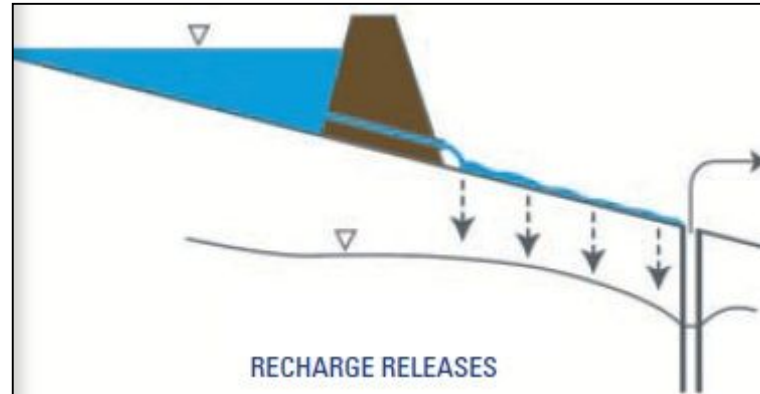
Gale e Dillon (2005) afirmam que como a água é limitada a essas estruturas para períodos curtos, a terra pode ser cultivada imediatamente a seguir, afim da utilização da umidade do solo, contribuindo para uma possível colheita anual adicional. Os processos de cultivo da terra também mantêm a capacidade de infiltração, favorecendo assim os próximos períodos de entrada.

- **Represas com descarga**

Em locais onde o escoamento superficial ocorre de forma intensa, grandes quantidades de sólidos em suspensão fazem-se presente, dificultando a infiltração da água no leito do rio. Nestes casos as construções de represas no leito dos rios podem solucionar esta problemática, facilitando a sedimentação. Estas represas liberam a água através de tubos de descarga para trechos à jusante do rio, ocorrendo assim a recarga de água nos aquíferos (figura 10). Para além desta funcionalidade, estas estruturas são capazes de reter parte da energia resultante dos escoamentos torrenciais, estimula a deposição de sólidos suspensos, e o

controle da descarga de água para infiltração no leito do rio junto à jusante (GALE e DILLON, 2005).

Figura 10: Método esquemático de uma represa com zona de descarga (*recharge releases*) implementada no leito de rios.

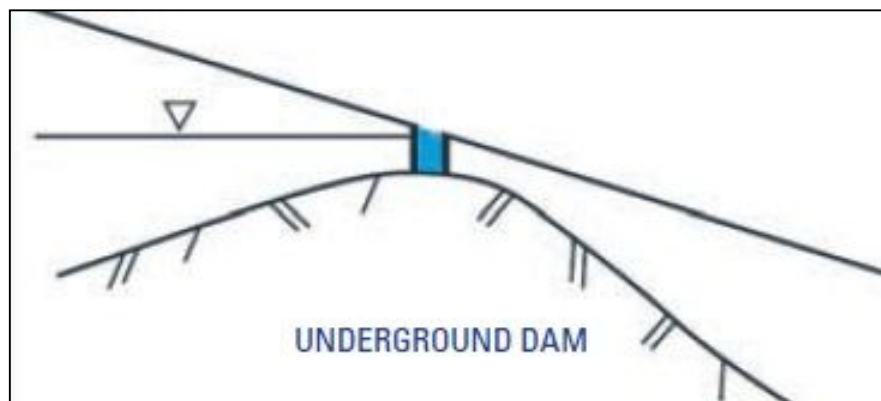


Fonte: Gale e Dillon (2005).

- **Represas subterrâneas**

As represas subterrâneas podem ser utilizadas de acordo Gale e Dillon (2005) para reter o escoamento natural da água no aquífero freático subjacente ao leito do rio. Estas instalações consistem em grandes valas construídas em rios efêmeros, perpendicularmente ao leito do rio (figura 11), com uma profundidade tal que possa atingir a base do aquífero, sendo estas estruturas preenchidas por materiais de baixa permeabilidade e selantes. A recuperação da água que se infiltra neste sistema é recuperada através de poços ou furos próximos.

Figura 11: Método esquemático do sistema de recarga artificial através de represas subterrâneas (*underground dam*) em leitos de rios.



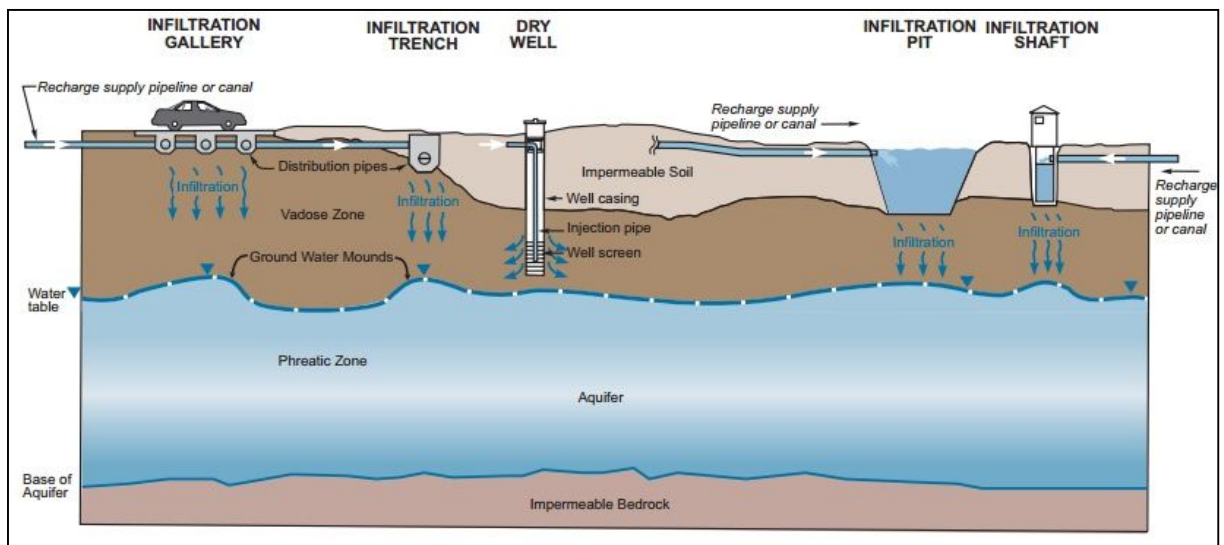
Fonte: Gale e Dillon (2005).

5.1.2 Técnicas de recarga artificial na zona vadosa

Os métodos de recarga artificial na zona vadosa são aqueles empregados em solos que não são permeáveis o suficiente para que ocorra o processo de infiltração através da superfície. Nestes casos o sistema de recarga é feito de forma vertical, através da construção de trincheiras ou poços instalados na zona não saturada (BOUWER, 2002).

Estas instalações permitem a passagem da água pelos níveis superficiais mais impermeáveis, níveis suspensos ou níveis confinantes na zona não saturada e a sua posterior colocação na zona saturada pelo processo de infiltração até ao aquífero (SEWRPC, 2006). Os métodos que serão descritos a seguir foram designados conforme a divisão de Diamantino (2009), nomeadamente os poços na zona não saturada, as trincheiras e galerias de infiltração e os aquíferos artificiais (figura 12).

Figura 12: Métodos comuns de infiltração subterrânea, incluindo trincheiras e galerias (*infiltration gallery and trench*), poços secos (*dry wells*), poços de infiltração (*infiltration pit*) e trincheiras de infiltração (*infiltration shaft*).



Fonte: SEWRPC (2006).

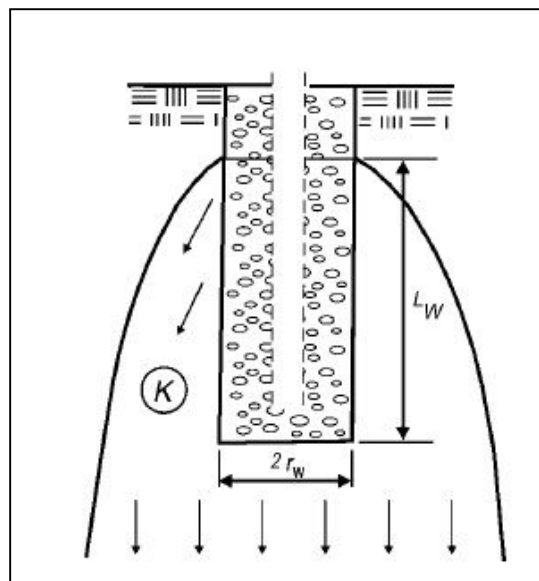
- **Poços na zona não saturada**

Os poços secos são furos na zona vadosa, normalmente com cerca de 10 a 50 m de profundidade e cerca de 1 a 1,5 m de diâmetro. Os poços secos são normalmente perfurados em formações permeáveis na zona vadosa que podem aceitar a água de escoamento a taxas suficientes. Onde a água subterrânea é relativamente profunda, os poços secos são muito mais baratos do que os poços de injeção e, portanto, é tentador usar poços secos para recarregar a

água subterrânea em vez de poços de injeção que devem ir até o aquífero. Para proporcionar uma recarga adequada, os poços secos devem penetrar em formações permeáveis durante uma distância substancial (NRC, 1994).

Díaz *et al.* (2000) se refere aos poços em zona não saturada, como poços secos ou poços em suspensão, sendo estes escavados ou perfurados de 10 a 50 metros de profundidade e de 1 a 2 metros de diâmetro. Para Bouwer (2002) os poços na zona vadosa possuem cerca de 1 metro de diâmetro, com profundidades de até 60 metros. Estas instalações são preenchidas com cascalho fino ou areia grossa, onde a água é normalmente aplicada através de um tubo perfurado ou blindado no centro (figura 13). A queda livre de água neste tubo deve ser evitada, de modo que o arrastamento de ar na água assim como a formação de ar retido sobre o aterramento e o solo ao redor da zona vadosa seja nulo (BOUWER, 2002).

Figura 13: Seção ilustrativa de um sistema de recarga através da zona vadosa através de poços com preenchimento de areia ou cascalho.



Fonte: Bouwer (2002).

A maior problemática que os poços secos apresentam é o processo de comaltação. Este processo se dá pela deposição de material sólido no interior dos poços. Nestes sistemas o efeito da comaltação se agrava em poços secos, já que estas instalações não podem ser bombeadas, reconstruídas ou reabilitadas. No entanto, a comaltação pode ser minimizada através da aplicação de um pré-tratamento na água de recarga, preenchendo os poços com areia grosseira ou cascalho fino, através da colocação de lâminas de aço ou tecido sobre os

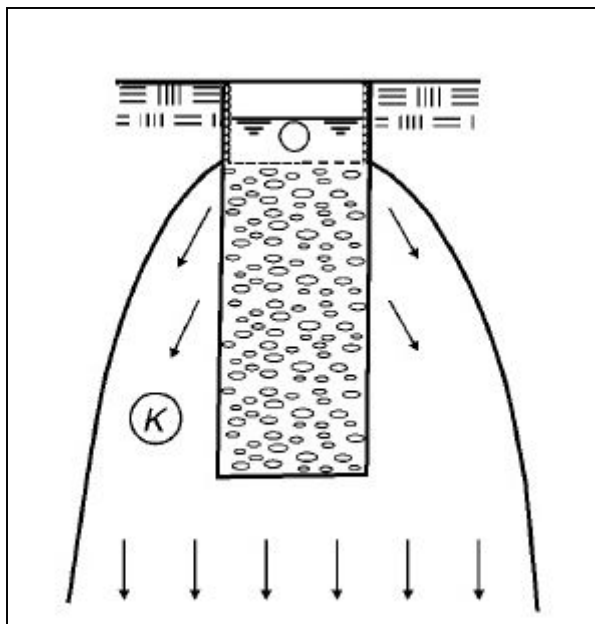
horizontes argilosos, com o objetivo de prevenir deslizamentos de terra e pela utilização de filtros de tecidos (geotêxtil; DÍAZ *et al.*, 2000).

Segundo Bouwer (2002), o potencial de comaltação de uma determinada água destinada a recarga artificial pode ser previsto, onde o método mais adequado para mitigar este problema consiste na prevenção desta água de recarga antes desta ser introduzida no aquífero, através da remoção de sólidos suspensos, do carbono orgânico assimilável, dos nutrientes e dos microrganismos, assim como a introdução de cloro para que se mantenha um nível residual no poço que reduza a atividade microbológica.

- **Trincheiras e reservatórios de infiltração**

As trincheiras de recarga são estruturas escavadas com uma retro escavadeira e possuem tipicamente 1 metro de largura a 5 metros de profundidade. Estas estruturas são preenchidas por cascalho fino e areia grossa, similar ao preenchimento dos poços na zona vadosa. Normalmente a água de recarga é aplicada através de um conduto tubular perfurado na superfície do aterro e a vala é coberta para misturar-se com o ambiente (figura 14), por exemplo, uma camada de solo superficial para gramas ou outras plantações podem ser colocadas acima do aterro, a fim de proporcionar uma mistura com o paisagismo, ou até placas de concreto ou outros tipos de pavimentos (BOUWER, 2002).

Figura 14: Seção ilustrativa de recarga artificial através de trincheiras preenchidas com areia e cascalho.



Fonte: Bouwer (2002).

As trincheiras e reservatórios são cobertas idealmente para mantê-las protegidas do sol, dos animais e pessoas (GALE e DILLON, 2005), sendo os seus principais agravantes similares ao das estruturas de poços instalados na zona vadosa, o processo de comaltação de acordo com Díaz *et al.* (2000), onde as medidas preventivas e remediadoras são de igual validade para ambos.

Conforme Gale e Dillon (2005), os métodos que consistem na instalação destas estruturas de trincheiras e reservatórios não são soluções economicamente viáveis, por apresentarem baixos índices no volume de recarga, limitando, portanto seu uso a reutilização de estruturas previamente disponíveis.

- **Aquíferos artificiais**

Consoante Díaz *et al.* (2000) os aquíferos artificiais ou aquíferos sintéticos são instalações que consistem basicamente em filtros de areia que recargam ou tratam águas negras ou outros tipos de águas com qualidades deterioradas. Estes sistemas de recarga ou tratamento são construídos através de poços com cerca de 2 metros de profundidade, revestidos lateralmente com material plástico. No fundo destas instalações são colocadas camadas de cascalho e tubos drenantes, já o poço é preenchido com areia ou outro material permeável.

O processo de recarga é realizado através de inundações com os efluentes de águas residuais por curtos períodos de tempo, posteriormente a instalação seca-se durante um determinado tempo formando uma capa comaltada com rachaduras, que pode ser retirada do sistema (DÍAZ *et al.*, 2000). Devido a sua baixa complexidade no processo de construção, o uso dos aquíferos sintéticos como recarga artificial vem sendo implementado desde 1995 em países como a França e Marrocos, destacando-se também seu uso em zonas rurais, pequenas urbanizações, hotéis e residências particulares (DÍAZ *et al.*, 2000).

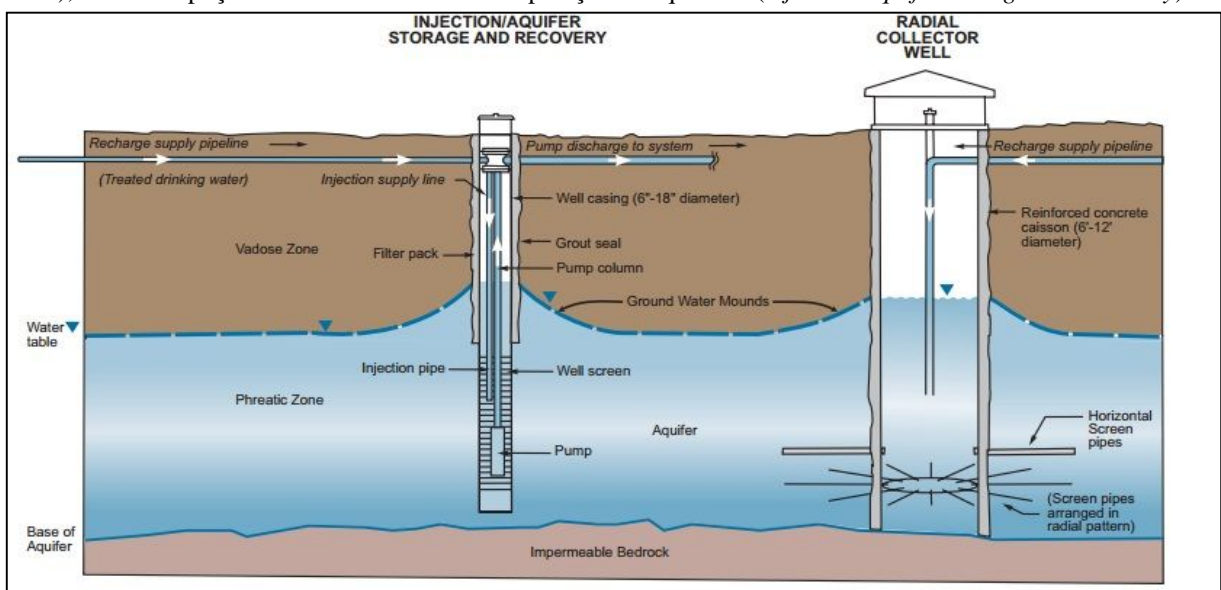
5.1.3 Técnicas de recarga artificial em profundidade

De acordo com Diamantino (2009), as técnicas de recarga artificial em profundidade são aquelas em que necessitam a construção de furos. Quando comparada as técnicas aplicadas à superfície dos solos torna-se mais onerosa, porém avaliando-se os métodos

adotados em superfície de um modo técnico, apresenta baixa complexidade quando comparada com os métodos adotados em profundidade, podendo ser igualmente eficiente em algumas situações.

As técnicas de recarga artificial de aquíferos aplicadas em profundidade segundo Diamantino (2009) consistem nos furos de injeção, os furos de armazenamento subterrâneo e de extração, os furos conjuntivos e as barreiras de infiltração (figura 15).

Figura 15: Métodos de injeção direta incluindo poços de injeção vertical, radial e horizontal (*radial collector well*), incluindo poços de armazenamento e recuperação de aquíferos (*injection aquifer storage and recovery*).



Fonte: SEWRPC (2006).

• Furos de injeção

Os furos de injeção direta são utilizados onde não estão disponíveis solos permeáveis o suficiente para que ocorra o processo de infiltração através da superfície. Nestes casos, instalações de trincheiras ou poços na zona vadosa não são adequadas, visto que os aquíferos são profundos ou por vezes confinados (BOUWER, 2002).

Os poços de injeção ou de recarga são construídos com o intuito de aumentar o armazenamento de água subterrânea nos aquíferos profundos, através do abastecimento de água em gravidade ou sobre pressão, onde o aquífero destinado ao reabastecimento é geralmente aquele que passou por excessivo processo de exploração. Estes poços podem ser executados também em regiões costeiras, com o objetivo de deter a entrada de água do mar nos aquíferos subjacentes, assim como podem combater problemáticas relacionadas à

subsistência de terrenos em locais onde os aquíferos confinados são fortemente bombeados (CGWB, 2007).

De acordo com NRC (1994) além dos altos custos na implementação de poços de injeção direta, um dos seus maiores problemas é o possível entupimento do aquífero ao redor do poço, principalmente na interface do furo entre o cascalho e o aquífero, onde os sólidos em suspensão podem se acumular e o crescimento bacteriano tende a se concentrar. Consoante o autor, estes poços são mais vulneráveis a processos de entupimento do que as instalações em sistemas superficiais de infiltração, visto que as taxas de infiltração no aquífero ao redor do furo são mais elevadas que das bacias de infiltração (NRC, 1994).

Tratamentos mitigadores podem ser adotados a fim de evitar o entupimento destes poços, que segundo Asano (1985) são: a) remoção de materiais inorgânicos e matérias orgânicas fracamente aderidas ao tubo através do bombeamento e jateamento lateral do poço; b) eliminação de material orgânico oriundo de bactérias, através da adição de agentes biocidas e oxidantes; e c) remoção de incrustações proveniente de precipitações químicas através da utilização de tratamentos químicos característicos.

- **Furos de armazenamento subterrâneo e de recuperação**

Um rápido crescimento na prática de recarga artificial de aquíferos através da utilização de furos de armazenamento subterrâneo e de recuperação, técnica reputada como *Aquifer Storage and Recovery* (ASR), tem sido notório, conforme NRC (1994). Segundo o autor, estes poços podem combinar funções de recarga e bombeamento, sendo destinados para recarga quando o excesso de água está disponível e são bombeados quando a água é necessária. Os poços ASR (figura 16) são normalmente utilizados para o armazenamento sazonal de água potável em áreas onde a demanda de água é significativamente maior no verão do que no inverno ou vice-versa, onde as usinas de tratamento de água potável podem ser construídas para atender a demanda média ao invés de picos.

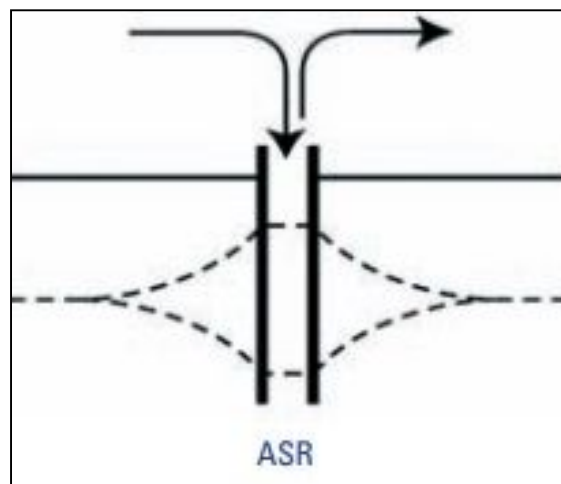
De acordo com SEWRPC (2006), os sistemas de armazenamento e recuperação de aquíferos usam poços de injeção para armazenar água em um aquífero. A água é geralmente tratada com água potável, embora sistemas que usam águas residuais tratadas tenham sido desenvolvidos e sistemas que usam águas pluviais parcialmente tratadas têm sido propostos. A água é armazenada no aquífero ao redor do poço e recuperada, tipicamente bombeando o mesmo poço, para reutilizar a água com tratamento adicional mínimo. Os sistemas de

armazenamento e recuperação de aquíferos são mais desenvolvidos em aquíferos confinados, embora alguns sistemas em aquíferos não confinados tenham sido desenvolvidos.

De forma teórica, o sistema de ASR funciona da seguinte forma: 1) a água injetada se move como uma única massa para o aquífero e desloca a água subterrânea nativa como uma camada uniforme de água; e 2) a água injetada é posteriormente recuperada por bombeamento do poço. Em teoria, a água armazenada volta para o poço lentamente de forma uniforme com pouca mistura com a água subterrânea. Na prática, é impossível obter esse fluxo uniforme em um aquífero, visto que as heterogeneidades no aquífero causam taxas de fluxo desiguais e promovem mistura e dispersão com as águas subterrâneas nativas. Isto é especialmente importante quando os aquíferos saturados, ou múltiplos aquíferos, são usados como zonas de armazenamento para sistemas de armazenamento e recuperação (SEWRPC, 2006).

As problemáticas oriundas de misturas de águas são, no entanto parcamente significativas caso a água subterrânea nativa na zona de armazenamento for de qualidade aceitável. As diferenças de densidade em aquíferos salinos ou salobras aumentam o grau de mistura e reduzem a eficiência de recuperação do sistema (SEWRPC, 2006).

Figura 16: Método esquemático do sistema de recarga artificial através de poços *Aquifer Storage and Recovery* (ASR).



Fonte: Bouwer (2002).

- **Furos conjuntivos**

De acordo com Kummar e Fall (1997), furos conjuntivos são aqueles empregados tanto em aquíferos confinados como em aquíferos profundos artesianos. Nestas instalações a

água é bombeada do aquífero mais profundo, culminando na redução da sua superfície potenciométrica, abaixo do lençol freático, onde se encontra o aquífero superior, com isso a água do aquífero superficial é drenada diretamente para o aquífero mais profundo. Segundo o autor três vantagens são observadas no uso de furos conjuntivos para a recarga artificial de aquíferos: 1) a utilização de águas subterrâneas livres de sedimentos, reduzindo grandemente o processo de comaltação; 2) a redução da quantidade de perda de água por evapotranspiração do lençol freático; e 3) a redução de possíveis efeitos de inundação em alguns locais.

Nesta técnica os efeitos ambientais devem ser cuidadosamente estudados, a fim de assegurar que zonas úmidas não passem por processos de desidratação ou que a redução do fluxo de base não ocorra, assim como análise de possíveis processos de coagulação resultantes de misturas de águas subterrâneas quimicamente diferentes (O'HARE *et al.*, 1986).

- **Barreira de infiltração**

A técnica de barreiras de infiltração consiste na disposição de galerias ou linhas paralelas e pouco distanciadas, instaladas em leitos de rios. Na ausência dos poços, haveria saída livre de água para o rio. Quando pequenas quantidades de água subterrânea são retiradas da galeria paralela ao rio, a quantidade de descarga subterrânea para o rio diminui. A recuperação da água pela galeria consiste inteiramente da água subterrânea natural. Cada retirada de água subterrânea é acompanhada por uma retirada no lençol freático. Para taxas de recuperação elevadas, este abaixamento tende a diminuir o lençol freático na costa abaixo do nível do rio. Dessa maneira, as águas superficiais do rio serão induzidas a entrar no aquífero e a fluir para a galeria. Em áreas onde a corrente é separada do aquífero por materiais de baixa permeabilidade, a fuga do fluxo pode ser tão pequena que o sistema não é viável (O'HARE *et al.*, 1986).

Segundo Gale *et al.* (2002), as águas dos rios e dos lagos costumam transportar uma quantidade considerável de matéria em suspensão, portanto, se a água entra no aquífero, este material fino é filtrado no fundo do rio ou do lago. Para impedir uma obstrução rápida do leito do córrego ou do fundo do lago o autor sugere que a taxa a qual a água de superfície entra no aquífero deve ser baixa e as margens dos rios devem ser escavadas durante os períodos de fluxo baixo, a fim de remover os sedimentos e a matéria orgânica.

5.2 APLICABILIDADE

A recarga artificial de aquíferos tem sido a maneira, já por mais de 200 anos, para se resolver muitos problemas relacionados com a oferta de águas subterrâneas, seu uso e suas consequências. A técnica é conhecida mundialmente, sendo empregada principalmente em países como Estados Unidos, China, Austrália, Índia, Israel, Espanha e Holanda, de acordo com a recente ferramenta *Global Ground Water Information System* (2004), criada pela *Internacional Ground Water Resources Assessment Centre* (IGRAC), que fornece uma indicação preliminar sobre a existência de estudos de gestão de recarga artificial em mais de 50 países (DIAMANTINO, 2009).

Os sistemas de ASR são pioneiros nos Estados Unidos, sendo estes utilizados desde 1969. Aproximadamente 69 projetos estão em funcionamento (SEWRPC, 2006) e estes se concentram em sua maioria nas zonas áridas e semi-áridas do país, destacando-se os estados do Arizona, Califórnia, Nevada, Florida, Colorado, Kansas, New Jersey e New York (ASCE, 2001). Nos Estados Unidos, assim como em outros países, o objetivo principal da utilização da RAA é o seu uso posterior, como no projeto implantando no estado de Arizona onde o objetivo foi utilizar a água acumulada durante o inverno para utilizá-la em irrigação (TOY *et al.*, 1999).

Na Europa, os principais países que adotam o método de RAA são Espanha, Holanda, Alemanha, Finlândia, Suécia, Dinamarca, Áustria e Hungria. Ao norte de Londres, nos anos indicados como chuvosos por um modelo de simulação estocástica que utiliza séries históricas, onde ocorre o excesso de água no sistema de abastecimento, existe um sistema de recarga artificial que aproveita esta água para injetá-la em poços sob o rio principal (O'SHEA, 1999).

No Reino Unido, o sistema de armazenamento e recuperação artificial (ASR) tem sido empregado para servir a dupla finalidade de aumentar a água subterrânea durante o inverno e, em seguida, recuperar esta água aumentada durante o verão. O processo envolve a injeção de água no aquífero nos momentos de alta oferta e, em seguida, recuperar a água durante o período de baixa oferta. Isto é feito injetando a água potável por furos. O sucesso do ASR depende da capacidade de mistura da água injetada e da água nativa e da taxa de recuperação da água injetada (KAVURI, BODDU e ANNAMDAS, 2011).

Em diversos países africanos e asiáticos como Índia, Irã e Israel a recarga artificial de aquíferos é utilizada com frequência, como exemplo em Israel onde as técnicas de recarga

artificial obtiveram grande desenvolvimento e são responsáveis pelo incremento no abastecimento de água em várias regiões do país (ALMEIDA, 2011).

Na América do Sul as técnicas de recarga são pouco difundidas e fortuitos os exemplos de usos significativos de sistemas de recarga artificial de aquíferos. No Brasil a implementação de técnicas de recarga artificial de aquíferos embora ascenda paulatinamente, alguns avanços no que tange a projetos acadêmicos de cunho experimentais podem ser observados na última década, assim como a ampliação da agenda de discussões sobre gestão das águas subterrâneas (ALMEIDA, 2011).

Na região de Caldas Novas- GO, Almeida (2011) viabilizou estudos com o objetivo da instalação de um projeto piloto de recarga artificial e avaliação na viabilidade de mecanismos de recarga artificial da porção termal do Sistema Aquífero Araxá, com uso de águas previamente utilizadas na circulação em piscinas termais. O projeto contou com a realização de perfilagens óticas e ensaios hidráulicos nos poços termais (figura 17), além de ensaios hidroquímicos e isotópicos, onde estes dados foram integrados com estudos prévios de geofísica, geologia estrutural e de solos no aquífero freático, e em poços de injeção no Aquífero Araxá.

Figura 17: Poços rasos preenchidos com material granular, submetidos a ensaios preliminares com injeções de água. Estação experimental do Sistema Piloto de Recarga Artificial.



Fonte: Almeida (2011).

Como resultado, os estudos para viabilização da recarga artificial no Sistema Aquífero Araxá, possibilitou a proposição de um modelo de recarga artificial através de um monitoramento da qualidade das águas de descarte das piscinas termais (figura 18), com o tratamento prévio, inicialmente em períodos de baixa temporada, podendo ser ampliado para outros períodos após aprimoramento do modelo e monitoramento.

Figura 18: Piscina termal e caixa de descarte de águas termais destinadas para reutilização como recarga artificial para os aquíferos termais da região de Caldas Novas-GO.



Fonte: Almeida (2011).

Estudos na planície do Recife-PE realizados por Montenegro *et al.* (2005) também viabilizaram a construção de um sistema piloto de recarga artificial nos Aquíferos Boa viagem e Aquífero Cabo, de característica semi-confinado, por poços injetores através da reutilização de águas pluviais. O sistema piloto contou com a construção de um sistema de captação de águas pluviais em um condomínio instalado na região de criticidade do Aquífero Cabo, onde o volume de águas pluviais seria significativo. No sistema de captação de águas pluviais (figura 19), o método esquemático implementado permitia a seleção de quais áreas do condomínio seriam destinadas ao sistema de captação, através de um sistema de registros. Após a água ser captada, esta era direcionada para um reservatório no subsolo e logo após injetada através de poços injetores.

Figura 19: Sistema de captação de águas pluviais.



Fonte: Montenegro (2005).

O projeto foi viabilizado devido ao intenso bombeamento de ambos os aquíferos costeiros, onde essa super exploração associada ao desequilíbrio com o processo de recarga natural, que é insuficiente, ocasionou elevados rebaixamentos na potenciometria destes aquíferos e vulnerabilidade dos mesmos quanto a possíveis processos contaminantes advindos de camadas superiores, bem como a susceptibilidade à intrusão marinha. O projeto obteve como resultado através da utilização de modelos numéricos, uma simulação de vazão de 2,16 m³/h, injetada durante 3 horas por dia, durante 3 meses, correspondendo ao período de chuvas mais frequentes (MONTENEGRO *et al.*, 2005).

5.2.1 Aplicabilidade local: município de Marabá-PA

Em algumas regiões a problemática envolta da falta de abastecimento de água se dá de forma alarmante como previamente citado, porém o município de Marabá, Estado do Pará, alvo de análise do presente tópico, se enquadra nas áreas que não sofrem pela falta expressiva de abastecimento de água, por rebaixamento dos aquíferos, mas sim pela má qualidade destas.

Segundo Diamantino (2009), a recarga artificial de aquíferos possui como objetivo aproveitar a capacidade natural que os aquíferos possuem para armazenar água, aumentando, por um lado, a disponibilidade da água subterrânea e/ou melhorando a sua qualidade, no caso de um aquífero afetado por um determinado tipo de poluição antropogênica, por exemplo, a poluição difusa, ou natural como a intrusão salina em aquíferos costeiros. Isto é, para além da injeção direta ou indireta de água em um aquífero a fim da reposição de seu nível potenciométrico, a RAA também é utilizada com a intenção de melhoria de qualidade da água de recarga, devido ao papel depurador do solo, como utilizado nas técnicas que lançam mão da reutilização de águas residuais tratadas (DIAMANTINO, 2009).

De acordo com PRIMAZ (1996), as unidades aquíferas da área urbana de Marabá são compostas pela Formação Couto Magalhães, onde representa cerca de 50% da totalidade das unidades representativas, composta por rochas cristalinas, secundariamente têm-se os sedimentos da Formação Itapecuru, com uma representatividade de aproximadamente 30%, e por fim as coberturas de manto de intemperismo e aluviões.

Segundo os dados hidrogeológicos fornecidos pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM, 1995), a área urbana de Marabá baseia-se basicamente em sistemas aquíferos em meios fraturados e de porosidade granular. A Formação Couto Magalhães caracteriza o aquífero fraturado como um sistema restrito às continuidades e

anisotropia do meio, a qual apresenta em geral permeabilidade por fissuras de forma localizadas. A Formação constitui-se de rochas com potencialidade hidrogeológica fraca, exceto nos casos onde existem condições de fraturas abertas e interligadas hidraulicamente. Já a formação Itapecuru, característica dos aquíferos porosos ocupa uma pequena faixa subaflorante no perímetro urbano, onde aflora tanto ao norte do rio Tocantins como a oeste do rio Itacaiúnas (PRIMAZ, 1996).

Entre os aquíferos porosos, tem-se ainda os aluviões que margeiam os rios Tocantins e Itacaiúnas e alguns de seus tributários, com espessuras entre 8 e 25 metros, podendo atingir profundidades maiores na confluência dos mesmos. Por apresentarem boa permeabilidade e porosidade devido as suas características litológicas, dispõem de excelentes perspectivas hidrogeológicas para bateria de poços “amazonas” de grandes diâmetros. Porém por apresentar baixa profundidade, apresenta restrição para o consumo humano, pois o caráter livre do aquífero o torna susceptível de poluição antrópica, a não ser que haja uma adequada proteção dessas áreas (PRIMAZ, 1996).

Recentemente estudos aplicados no município, explicitam a problemática quanto à qualidade da água, através da publicação de artigos e trabalhos científicos. Dentre estes, cabe destaque ao estudo feito por Leal (2010), que estudou os impactos nas águas subterrâneas gerados pela localização de cemitérios em meio urbano, particularmente no que diz respeito às águas subterrâneas. Para isso foram feitas análises físico-química e bacteriológicas em amostras de água em poços de nove (figura 20) residências localizadas nas proximidades do cemitério Jardim da Saudade no bairro do Aeroporto, núcleo Cidade Nova.

Figura 20: Coleta de água dos poços nas redondezas do cemitério Jardim da Saudade.



Fonte: Leal (2010).

Os resultados das análises bacteriológicas e físico-químicas permitiram concluir que a presença dos cemitérios contribuiu para o aumento da condutividade elétrica das águas subterrâneas de três amostras de água, que tem sua origem mais provável no necrochorume, onde aumentou o teor de sais dissolvidos nas águas subterrâneas, assim como foram detectadas as presenças de *coliformes fecais* e *Escherichia coli*, nas águas subterrâneas em sete amostras.

Matos (2016) similarmente realizou estudos no núcleo Cidade Nova. A pesquisa contou com a análise dos compostos nitrogenados, como amônia, nitrito e nitrato, realizadas em dez amostras de água, coletadas em poços situados próximos ao cemitério Jardim da Saudade no Bairro do Aeroporto. As análises químicas das águas subterrâneas coletadas em poços residenciais, um poço localizado em um posto de gasolina e de uma cerâmica no entorno do cemitério, obtiveram como resultado a detecção de contaminação por amônia em dois poços, quantidades toleráveis para o consumo humano de nitrito em um poço, e nitrato em nove poços, sendo que quatro destes estavam contaminados, pois apresentavam quantidades de nitrato acima dos valores máximos permissíveis (VMP) para o consumo humano, segundo o Ministério da Saúde.

Atendendo a necessidade de uma solução mitigadora ao quadro de criticidade exposto no município de Marabá quanto à qualidade deteriorada da água, o vigente trabalho sugere através da RAA, a instauração de medidas remediadoras aos exemplos previamente citados. Segundo Bouwer (2002) e Díaz *et al.* (2000) dentre as aplicações da recarga artificial de aquíferos destacam-se as seguintes: a) diluição do teor em nitratos, cloretos ou outros elementos químicos das águas subterrâneas de determinados aquíferos pela diluição com a água de recarga; e b) melhoria da qualidade da água através da remoção de sólidos suspensos pela filtração do solo.

Por meio das referidas aplicações, as problemáticas recorrentes a contaminação por nitratos e bactérias nos poços do núcleo Cidade Nova poderiam ser remediadas mediante ao desenvolvimento de um projeto piloto de recarga artificial nos aquíferos porosos, característicos do referido núcleo urbano (figura 21). O projeto contaria com a implantação de técnicas de RAA aplicadas na zona vadosa ou em profundidade. A técnica de recarga artificial na zona vadosa seria instalada através da técnica SAT, que consiste em um sistema de geopurificação que utiliza recursos físicos, químicos e biológicos durante a infiltração de efluentes de águas residuais através de camadas do solo para a melhoria da qualidade da água (ABEL, 2014). Este processo reduz os compostos orgânicos sintéticos e nitratos, remove e degrada bactérias e vírus, reduz os compostos orgânicos biodegradáveis, volatiliza alguns compostos orgânicos voláteis e semi-voláteis e remove os metais, o fósforo e o flúor

(SEWRPC, 2006), ou seja, poços de recuperação da referida água contaminada seriam bombeados para um posterior jateamento desta água na superfície, onde através do processo de infiltração pela zona vadosa, os teores de nitrato e bactérias seriam remediados.

Figura 21: Mapa de localização dos poços contaminados no núcleo Cidade Nova, cidade de Marabá, estado do Pará.



Fonte: Autor.

Já a técnica em profundidade que poderia ser viabilizada no referido projeto piloto de RAA, seriam os poços de injeção direta, que poderiam ser locados próximos aos poços contaminados, a fim de que a água de recarga injetada no aquífero contaminado agisse como um “diluidor” nos teores de nitrato, resultando, portanto, na redução dos teores de nitrato e eliminação das bactérias detectadas nos referidos poços contaminados.

5.2.2 Sugestões para estudos futuros

Mediante a sugestão sobre a implementação de possíveis projetos de recarga artificial no núcleo Cidade Nova, cidade de Marabá, o referido trabalho sugere a continuação de estudos que viabilizem a remediação da qualidade da água dos poços contaminados.

Para a viabilização do projeto piloto estudos a finco a cerca dos processos dinâmicos dos aquíferos porosos característicos na referida área, deveriam ser executados, assim como sugere-se a viabilização de projetos de captação de águas pluviais para posterior injeção através de poços de injeção direta.

Para isso, parcerias poderiam ser feitas com empresas locais, como exemplo o empreendimento Supermercados Mateus e/ou o empreendimento Havan, ambos localizados nas proximidades dos poços contaminados (figura 21). Nestes empreendimentos os projetos de captação de águas pluviais poderiam ser efetivos no que diz respeito ao volume de água coletado, onde após a coleta destas águas, as mesmas passariam por tratamentos prévios para posterior injeção através de poços de injeção instalados em profundidade.

As técnicas de recarga artificial à superfície não foram viabilizadas devido à falta de infraestrutura urbana, o que acarretaria na possível contaminação por ação antrópica ou biológica na água de recarga.

Figura 22: Empreendimentos sugeridos para implantação de projeto de captação de águas pluviais.



Fonte: Autor

6 CONCLUSÕES

A análise da literatura, objetivo do referido trabalho, propiciou concluir que haja vista a crescente redução da recarga natural, devido ao aumento significativo da impermeabilização do solo urbano e o elevado consumo de água proveniente dos aquíferos, e sua inconsequente utilização, propalar a recarga artificial de aquíferos se torna fundamental, principalmente nas regiões que sofrem com a escassez hídrica, culminando na redução de patologias sociais e no desenvolvimento econômico no que tange as regiões que sobrevivem de atividades que necessitam do uso expressivo dos recursos subterrâneos.

Notou-se a falta de abrangência acerca de projetos de implementação da RAA no Brasil, onde a técnica comporta-se de forma incipiente e praticamente inexplorada. Em contrapartida, em países como Estados Unidos, Índia, Austrália e China observaram-se a fomentação quanto à inserção da técnica, com o objetivo da reposição dos recursos hídricos subterrâneos que abastecem a população destes de forma substancial.

Torna-se necessário também através da RAA, a execução de medidas que visem à reposição da qualidade das águas subterrâneas, visto o ascendente descuido por parte dos órgãos responsáveis destinados a manutenção e asseguarção de água boa qualidade para futuras gerações, assim como por parte da população que não se intimida quanto à degradação de algo destinado ao seu próprio consumo. Nota-se entre linhas que o descaso quanto aos recursos hídricos subterrâneos advém de um “ilusionismo social” quanto à abundância de água, assim como por inexistência de fiscalizações abruptas a um dos elementos essenciais da vida.

Através da análise de trabalhos realizados em Marabá, Estado do Pará, fora possível concluir também que o crescimento desordenado afeta a qualidade das águas subterrâneas em meio urbano. Com isso, o referido trabalho sugeriu a instauração de forma teórica de um projeto piloto que viabiliza-se a instauração de técnicas de RAA, para o estabelecimento de boa qualidade de água da área em questão. Para a execução do projeto estudos a finco deveriam ser instalados na região, lançando mão de estudos geofísicos aplicados, testes de bombeamentos entre outros pré-requisitos que são necessários para a aplicação de uma recarga artificial, além de enquadramento segundo as resoluções do Conselho Nacional de Recursos Hídricos, que estabelece diretrizes para a instauração.

A inexistência de alardes quanto à racionalização dos recursos hídricos, culmina em um cenário caótico não muito distante, que será instaurado em todo o Brasil e no mundo. Portanto difundir a RAA agrega não só a reversão de uma possível crise hídrica, como

também assegura de forma quantitativa e qualitativa o suprimento e abastecimento de água para um futuro próximo onde a reposição natural dos aquíferos não poderá ser mais executada.

REFERÊNCIAS

- ABAS (2016) – Associação Brasileira de Águas Subterrâneas – www.abas.gov.br <Acesso em: agosto de 2016>.
- ABEL, C. D. T. Soil Aquifer Treatment: Assessment and Applicability of Primary Effluent Reuse in Developing Countries. UNESCO-IHE, Institute for Water Education, 2014.
- ALMEIDA, Leonardo de. Estudo da aplicabilidade de técnicas de recarga artificial de aquíferos para a sustentabilidade das águas termais da região de Caldas Novas-GO. 2011. (Capítulos 3 e 4).
- ASANO, T. 1985. Artificial Recharge of Groundwater. Butterworth Publishers, Califórnia, 767 p.
- 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, WHO Kobe Centre Conference Room, Kobe, Japan. 1999. p. 8-10.
- ASCE (2001). Standard guidelines for artificial recharge of groundwater. American Society of Civil Engineers, EWRI/ASCE 34-01.
- BOUWER, Herman. Artificial recharge of groundwater: hydrogeology and engineering. Hydrogeology Journal, v. 10, n. 1, p. 121-142, 2002.
- BOUWER, Herman. Issues in artificial recharge. Water Science and Technology, v. 33, n. 10-11, p. 381-390, 1996.
- BRASIL. Ministério da saúde. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Portaria nº 518, de 25 de março de 2004. Estabelece os procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seus padrões de potabilidade.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional de Recursos Hídricos. Resolução nº 153, de 17 de dezembro de 2013. Estabelece critérios e diretrizes para implantação de recarga artificial de aquíferos no território Brasileiro.
- CACHERO, J. L. A.; GOMEZ, J. A. O. G.; DÍAZ, J. M. M. Artificial recharge as a technique to alleviate the overexploitation of small aquifers located on the Spanish mediterranean coast. Project of CICYT, HID, p. 96-1326, 2001.
- CGWB (2007). Manual on artificial recharge of groundwater. Central Ground Water Board, Ministry of Water Resources, Government of India, New Delhi.
- CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. 1995. Disponível em: www.cprm.gov.br. <Acesso em: 12 de setembro de 2016>.

- DIAMANTINO, C. Recarga artificial de aquíferos: aplicação ao sistema aquífero da campina de Faro. 2009. Tese de Doutorado. Tese de Doutoramento em Geologia, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal.
- DÍAZ, J.M. M.; GÓMEZ, J.A.O. G.; CACHERO, J. L. A.; CASTANO, S. C. (2000). Recarga Artificial de Aquíferos. Síntesis Metodológica. Estudio. Actuaciones Realizadas em La Provincia de Alicante. Edições López Geta, J.A. Hernández, L. R. Disponível em URL: <http://www.igm.es/internet/webaguas/publica/libro36.html>. <Acesso em 20/09/2016>
- FALKENMARK, M. Water scarcity generates environmental stress and potential conflicts. Lewis Publishers, Inc., 1992.
- FETTER, C. W. 1994. Applied Hydrogeology. Mac Millan College Publ. Co. 3° ed. New York, 619 p.
- GALE, I. N.; DILLON, P. (2005). Strategies for Managed Aquifer Recharge (MAR) in semi-arid areas. UNESCO, 2005.
- GALE, I. N.; NEUMANN, I.; CALOW, R. C.; MOENCH, M. The effectiveness of Artificial Recharge of groundwater: a review. British Geological Survey, Commercial Report CR/02/108N, 2002.
- HESPANHOL, I. Um novo paradigma para a gestão de recursos hídricos. estudos avançados, v. 22, n. 63, p. 131-158, 2008.
- HESPANHOL, I. Potencial de reuso de água no Brasil: agricultura, indústria, municípios, recarga de aquíferos. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 7, n. 4, p. 75-95, 2002.
- ISRAELSEN, O. W. Irrigation Principles and Practices. LWW, 1950.
- KAVURI, M.; BODDU, M.; ANNAMDAS, V. G. M. New methods of artificial recharge of aquifers: A review. Poster presented at the 4th International Perspective on Water Resources & the Environment (IPWE), National University of Singapore (NUS), Singapore, p. 4-6, 2011.
- KUMAR, N. N.; FALL, N. A. Artificial Recharge of Groundwater. Methods, Hydraulics and Monitoring, Virginia, p. 69-127, 1997.
- LEAL, V. M. C. Avaliação físico-química e microbiológica das águas subterrâneas no em torno do cemitério Jardim da Saudade, bairro Aeroporto, núcleo Cidade Nova, cidade de Marabá, sudeste do estado do Pará. Trabalho de conclusão de curso - Universidade Federal do Pará, Marabá-PA. 2010.
- MATOS, R. C. N. 2016. Análise do comportamento dos compostos nitrogenados, em águas subterrâneas no núcleo Cidade Nova - Marabá-PA. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Marabá-PA.
- MONTENEGRO, S. G. Recarga artificial de aquíferos com águas pluviais em meio urbano como alternativa para a recuperação dos níveis potenciométricos: estudo de caso na

planície do Recife (PE). V Simpósio Brasileiro de Captação e Manejo da Água de Chuva - ANAIS. Teresina/PI, 2005.

MOURA, A. N. Recarga artificial de aquíferos: os desafios e riscos para garantir o suprimento futuro de água subterrânea. *Águas Subterrâneas*, nº. 1, 2004.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL. Ground water recharge using waters of impaired quality. National Academies Press, 1994.

O'HARE, M. P., FAIRCHILD, D. M., HAJALI, P. A., CANTER, L.W., 1986. Artificial Recharge of Groundwater.

O'SHEA, M. J.; SAGE, R. Aquifer Recharge: An Operational Drought-Management Strategy in North London. *Water and Environment Journal*, v. 13, n. 6, p. 400-405, 1999.

PRIMAZ. Programa de Integração Mineral em Municípios da Amazônia. Superintendência Regional de Belém. Potencialidades hidrogeológicas da área urbana de Marabá com proposta técnica para perfuração de poços tubulares para abastecimento de água subterrânea. Marabá, 1996.

PYNE, R.; Groundwater recharge and wells: a guide to aquifer storage recovery. CRC press, 1994.

SEWRPC (2006) State-of-the-art of water supply practices Report. Southern Wisconsin Regional Planning Commission. Technical Report nº. 43.

TODD, D K. 1959. Annotated Bibliography on Artificial Recharge of Ground Water Through 1954. U.S. Geological Survey Water Supply p, 1477.

TOY, D.; GOLDMAN, F.; WALKER, V. 1999. Aquifer recharge and Recovery: a Case Study of the Sun Lakes Effluent Recharge/Recovery Pilot Project- First Year of Operation. The 9th Biennial Symposium on the Artificial Recharge and Integrated Water Management. Tempe, Arizona.

TUNDISI, J. G. Novas perspectivas para a gestão de recursos hídricos. *Revista USP*, n. 70, p. 24-35, 2006.

TUNDISI, J. G. Água no século XXI: enfrentando a escassez. Rima, 2003.

YASSUDA, E. R. Gestão de recursos hídricos: fundamentos e aspectos institucionais. *Revista de Administração Pública*, v. 27, n. 2, p. 5-18, 1993.