





Diretrizes para Implantação de Recarga Artificial de Aquíferos no Domínio dos Cerrados do Brasil

Guidelines for Artificial Recharge of Aquifers in the Brazilian Savanna Region

José Eloi Guimarães Campos , Drielly Souza Rodrigues , Ana Beatriz Alcântara Rocha ,
Tatiana Diniz Gonçalves 

Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, Brasília, DF, Brasil

E-mails: eloi@unb.br; driellysrodrigues@gmail.com; anab.alcantara@gmail.com; tathidg@gmail.com

Resumo

Este trabalho tem como objetivo apresentar as diretrizes para a implantação ordenada, efetiva e volumetricamente significativa de sistemas de recarga artificial em regiões com padrão climático dos cerrados. A recarga natural e artificial nestas regiões é controlada pela forte sazonalidade do clima, pela natureza variável da geologia (diversidade de substratos rochosos), pelo contexto geomorfológico (padrão de relevo variável) e tipos de solos contrastantes. Para a recarga artificial são considerados três sistemas para indução da infiltração das águas de chuva: caixas de recarga, trincheiras de recarga e calhas de recarga. Nos três casos a água da chuva deve ser captada de coberturas de edificações com auxílio de calhas e tubulações e deve ser direcionada para os sistemas preenchidos por cascalho que resultam em condições de elevada permeabilidade que tem a função de induzir a infiltração da água no solo. Mesmo que considerada por legislação específica, a implantação da recarga artificial de forma ampla necessita da participação dos usuários e demais parcerias. O presente trabalho apresenta os conceitos e formas de aplicação de recarga artificial dos aquíferos, os critérios de viabilidade para a recarga artificial e as formas de operacionalização para áreas situadas em zonas de clima úmido e subúmido. A instalação eficaz e em taxas significativas deverá trazer inúmeras vantagens na gestão dos recursos hídricos, incluindo: aumento da disponibilidade hídrica nos aquíferos, manutenção de vazões de nascentes, diminuição do escoamento de águas superficiais, redução do risco de enchentes e diminuição dos processos erosivos, dentre outros.

Palavras-chave: Técnicas de recarga artificial; Gestão de aquíferos; Solos

Abstract

This paper aims to present the general lines for the effective and numerically significant employment of artificial aquifer recharge systems in the Brazilian Savanna region. Due to the climatic characteristics as tough seasonality, geologic nature of the rocks, geomorphologic (relief patterns) and pedologic (soils types) in this region. Three distinct models to rain waters infiltration induction are considered: recharge digs, recharge trenches and recharge gutters. In the three cases the rainwater caught from the roofs by gutters and tunings is directed for the recharges systems filled by coarse gravel of high hydraulic conductivity to induce the infiltration of the water into the ground. Although obligatory by specific legislation, the effective application of artificial recharge will need the participation of partnerships with water user, government agencies, education institutions and the population as a whole. This paper brings all the necessary information to instruct the users to implant systems in their proper lands, including the synthesis of the environment knowledge of the Brazilian Savanna region, the concepts and forms of application of aquifers artificial recharge, the criteria of viability for the artificial recharge and the forms to establish it. The efficient installation in numerical significant cases will bring enormous advantages in the water resources management, including: increase of water availability in the aquíferos, guarantee of maintenance of discharges to springs, reduction of overland flow, reduction in the risk of floods, decrease of erosive processes, amongst others.

Keywords: Techniques of artificial recharge; Aquifer management; Soils

1 Introdução

O Domínio Morfoclimático do cerrado ocupa cerca de 1,5 milhões de quilômetros quadrados principalmente na porção central do Brasil (Figura 1), além de áreas periféricas (Ribeiro & Walter 1998). Nesta região há ampla diversidade geológica, pedológica e geomorfológica, contudo, há ampla estabilidade climática e vegetacional (Adámoli *et al.* 1987; Eiten 1994; Nimer 1989). O clima pode ser classificado como tropical sazonal de inverno seco e a vegetação inclui diferentes fitofisionomias, com destaque para o cerrado *sensu strictu*, campos limpo e sujo, mata de galeria, mata estacional decídua, campo rupestre e campo de áreas úmidas.

A recarga artificial é uma técnica que efetivamente pode ser útil à gestão dos recursos hídricos (Campos 2004; Fetter 2003; Loucks 2000; Villaroya & Adwell 1998). A aplicação destas técnicas deve favorecer ao aumento da disponibilidade hídrica superficial e subterrânea, uma

vez que, ambos os mananciais são abastecidos por águas de chuvas e em muitos casos apresentam forte conexão hidráulica.

Em muitas localidades do Domínio Morfoclimático dos cerrados no Brasil se observa limitada disponibilidade hídrica superficial e a exploração de reservatórios subterrâneos é uma alternativa para o abastecimento de água.

O acelerado processo de urbanização e o adensamento populacional observado nas últimas décadas nos centros urbanos têm provocado drástica redução dos volumes de infiltração de água no solo, devido a impermeabilização de áreas responsáveis pela recarga natural dos sistemas subterrâneos (Justino 2003). Essas áreas estratégicas são aquelas localizadas em regiões com solos espessos, naturalmente permeáveis, com relevos planos e baixa declividade, onde a infiltração da água da chuva é favorecida.



Figura 1 Localização do domínio vegetacional e climático dos cerrados e demais biomas do Brasil

Fonte: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, IBGE 2021.

No sentido de minimizar os efeitos nocivos da impermeabilização dos solos, decorrente da expansão populacional, e da sobreexploração dos sistemas aquíferos, a recarga artificial se faz necessária como a principal ferramenta de gestão da disponibilidade de água. Esta prática consiste em qualquer processo que induza a infiltração ou injeção de água nos sistemas aquíferos, podendo ser por meio de caixas ou barragens de infiltração, espalhamento de água sobre o solo, sulcos paralelos às curvas de nível, poços de injeção, etc. (Fetter 2003).

Dentre as vantagens de adotar técnicas de recarga artificial destacam-se o controle, a manutenção ou a elevação dos níveis de água dos sistemas subterrâneos, o controle da subsidência do terreno, a depuração de contaminantes e a mineralização das águas infiltradas. Além disso, a recarga artificial pode gerar uma reserva estratégica de água, para períodos de escassez.

A escassez de água, que gradativamente afeta os dependentes dos recursos subterrâneos, tem levado muitas regiões do mundo a utilizar a recarga artificial, não só como uma forma de recompor ou elevar o nível e a qualidade de água de seus aquíferos, mas também como uma maneira de armazenar água.

Deve-se considerar, também, a relação entre as águas superficiais e subterrâneas e a importância dos aquíferos na regularização da rede de drenagem superficial que inclui córregos, rios, lagos, nascentes e demais corpos hídricos. No prolongado período sem chuvas na região dos cerrados todos os cursos d'água perenes são mantidos pela descarga dos aquíferos.

A recarga artificial dos aquíferos é importante na gestão do ciclo hídrico como um todo, mesmo em áreas que não utilizam os recursos subterrâneos para abastecimento ou para complemento do abastecimento. Os aquíferos, principalmente os rasos ou freáticos, associados aos solos espessos da região dos cerrados são fundamentais para a manutenção da perenidade de nascentes e demais corpos hídricos superficiais. Ainda é essencial informar que as águas infiltradas nas áreas de geração do escoamento superficial deverão minimizar o escoamento superficial, controlando as enchentes rápidas (*flash floods*) em áreas urbanas, processos erosivos e assoreamento dos córregos.

Além das vantagens de desenvolver e aplicar projetos de recarga artificial dos aquíferos, ainda há a necessidade por imposição legal. A Resolução 153/2013 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos estabelece critérios e diretrizes para implantação de recarga artificial de aquíferos no território brasileiro. Além destas diretrizes, existem leis específicas que determinam a obrigatoriedade de se desenvolver a recarga artificial dos mananciais subterrâneos. Como exemplo cita-se a Lei 3.793/2006 que instituiu, no Distrito Federal, o sistema de recarga artificial de aquíferos.

Assim, os objetivos deste estudo incluem: propor métodos para implantação da recarga artificial dos aquíferos na região do domínio morfoclimático dos cerrados e apresentar um diagnóstico da viabilidade de implantação da recarga artificial em diferentes contextos de meio físico.

1.1 Recarga Natural dos Aquíferos

A recarga natural inclui a parcela das águas de chuvas que depois de infiltrada nos solos alcança a zona saturada dos aquíferos. Desta forma, fica claro que alterações nas áreas de recarga como impermeabilização, compactação dos solos e desmatamento afetam o processo de recarga natural e conseqüentemente, o ciclo hidrológico.

No ciclo hidrológico a água da precipitação pode cair diretamente na superfície terrestre e infiltrar-se. A água que se infiltra no solo fica sujeita à evaporação, pode ser absorvida pelas plantas sendo posteriormente evapotranspirada, ou pode escoar em profundidade em direção à zona saturada subsuperficial; esta última é a água de recarga (Roseiro 2009).

A recarga natural dos aquíferos dá-se em áreas sob sua influência e que combinem dois fatores fundamentais: a disponibilidade de água seja oriunda de precipitação pluviométrica ou de corpos d'água superficiais; e a presença de formações geológicas que permitam a infiltração e transporte subterrâneo da água (ex. solos arenosos, rochas fraturadas ou carstificadas) (Moura 2004).

1.2 Recarga Artificial dos Aquíferos

Sabe-se que a água subterrânea não está distribuída de forma homogênea no planeta. Em alguns locais, em função do clima e de características geológicas, há disponibilidade desse recurso e em outros não. Para minimizar os efeitos da dependência desses fatores e da sobreexploração, a recarga artificial é muito utilizada em diferentes localidades do mundo.

A água utilizada em recarga pode ter diferentes origens: água residual de estações de tratamento, água dessalinizada, água de corpos hídricos superficiais, água da chuva recolhida dos telhados de casas e inclusive água subterrânea.

A recarga artificial pode ser praticada, a princípio, em qualquer tipo de formação permeável que tenha condições de armazenar e transmitir água. Pode ser definida como uma atividade planejada, cujo objetivo principal consiste em aumentar a quantidade de água subterrânea disponível, através da construção de infraestruturas projetadas para aumentar a recarga natural, facilitar a percolação das águas superficiais ou para introduzir diretamente a água no aquífero através de furos de injeção (Diamantino 2005; Díaz *et al.* 2000; Matthews 1991).

Fetter (2003) define que a recarga artificial consiste de qualquer processo que induza infiltração ou injeção de água nos aquíferos, seja ela planejada ou não. Roseiro (2009) define a recarga artificial de aquíferos como sendo o armazenamento de excedentes hídricos em meio subterrâneo nos períodos de maior disponibilidade para serem utilizados em períodos de seca ou escassez.

Dillon (2005) considera que a recarga artificial é uma ferramenta importante para a gestão da recarga de aquíferos, constituindo a forma mais barata para o abastecimento de pequenos aglomerados populacionais e constitui uma solução viável para alcançar os Objetivos do Milênio decretado pelas Nações Unidas, no ano 2000, no tocante à água potável acessível a todas as pessoas, principalmente em zonas semiáridas e áridas.

Um dos principais objetivos da recarga artificial consiste em aumentar a disponibilidade dos recursos hídricos subterrâneos, mas pode ser utilizada para outros fins como, por exemplo, para o controle da intrusão salina em aquíferos costeiros, armazenamento de água, redução da subsidência dos solos, melhoria da qualidade da água através da remoção de sólidos suspensos pela filtração, pelo solo ou através da diluição por mistura com as águas subterrâneas existentes.

A maioria dos trabalhos desenvolvidos sobre recarga artificial tem como propósito a ampliação das reservas hídricas. O presente trabalho pretende com a recarga artificial melhorar a qualidade da água de aquíferos contaminados no cerrado, a partir da diluição/tratamento *in situ* das águas subterrâneas.

2 Metodologia e Dados

Um dos principais fatores que irão influenciar na escolha do método de recarga artificial mais adequado para determinado local está relacionado ao conhecimento do mecanismo de recarga natural. Outros fatores importantes como clima, tipo de solo e rocha, índices pluviométricos, relevo, origem da água, uso e ocupação do solo, aspectos legais e econômicos também devem ser considerados.

Considerando os tipos de aquíferos a serem recarregados, a metodologia pode variar de recarga direta por infiltração no solo, mais adequada para aquíferos livres (freáticos), ou indireta por meio de poços que atinjam a zona saturada do aquífero, mais adequada para os confinados profundos.

Os métodos de recarga à superfície por infiltração no solo (direta) consistem em permitir a infiltração das águas através de uma extensa superfície de contato entre a água e o solo. Os métodos indiretos de recarga consistem na introdução de água no aquífero através de poços.

Díaz et al. (2000) consideram que os métodos utilizados para as operações de recarga dividem-se em: recarga à superfície e recarga em profundidade. Os métodos

de recarga à superfície podem ser aplicados ou não no leito dos rios. Os primeiros incluem as represas, as sarjas e os canais permeáveis; os segundos incluem as balsas, as valas, os canais e os terrenos extensos. Os métodos de recarga em profundidade incluem os furos de injeção, as grandes cavidades profundas no solo, os drenos, galerias e as valas e sondagens.

Gale et al. (2002) afirmam que a recarga artificial de aquíferos pode realizar-se, em termos gerais, do seguinte modo: (1) à superfície do solo, facilitando a infiltração da água através de bacias, canais, valas, etc., (2) na zona não saturada do solo colocando a água de recarga em valas de infiltração, poços ou furos, ou (3) diretamente no aquífero recorrendo à injeção da água. Estes sistemas de recarga podem agrupar-se nas seguintes categorias: (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; (6) captação de água da chuva em telhados.

Gale et al. (2002) dividem os métodos de recarga artificial em (1) métodos de espalhamento (bacias de infiltração, *Soil Aquifer Treatment* (SAT), inundações controladas, recarga incidental por irrigação); (2) métodos que provocam modificações no leito de rios (bacias de percolação a jusante de açudes de controle, represas de armazenamento de areia, açudes sub-superficiais, açudes permeáveis); (3) furos de injeção, furos de injeção e recuperação (*Aquifer Storage and Recovery* - ASR) e poços; (4) barreira de infiltração (*induced bank infiltration* e *interdune-filtration*); (5) coleta de água da chuva (*rainwater harvesting*).

A State-of-the-Art of Water Supply Practices (SEWRPC 2006) classifica os métodos de recarga artificial de aquíferos em (1) infiltração superficial por intermédio de bacias de infiltração; (2) infiltração subsuperficial por intermédio de furos ou valas na zona não saturada do solo; (3) recarga direta por intermédio de furos de injeção, que também podem ser de recuperação; (4) recarga facilitada através de alterações na superfície do solo que aumentam a recarga nas zonas naturais; (5) infiltração *riverbank* que inclui recarga induzida, que utiliza campos de poços nas proximidades de cursos de água, os quais induzem a recarga do escoamento superficial para o aquífero; (6) *water banking*, no qual, um aquífero é recarregado através de um dos métodos anteriores para recuperação futura.

Bouwer (2002) refere, de forma simplificada, a apenas quatro tipos de sistemas de recarga artificial: (1) infiltração superficial; (2) infiltração na zona não saturada; (3) poços; (4) sistemas de recarga combinados.

Fetter (2003) afirma que a recarga artificial pode ser realizada através de caixas ou barragens de infiltração, espalhamento de água sobre o solo, sulcos paralelos às curvas de nível, poços de injeção, dentre outros.

3 Resultados

3.1 Objetivos e Resultados Esperados da Aplicação de Técnicas de Recarga Artificial

Os objetivos mais comuns para aplicação das técnicas de recarga artificial e os resultados associados, incluem:

- armazenar água para a garantia da segurança hídrica ampliando a disponibilidade hídrica em quantidade e qualidade para suprir as demandas de usos múltiplos dentro da visão de desenvolvimento sustentável (Brown & Keys 1985; Goldshmid 1974; Katzer & Brothers 1989; Picot-Colbeaux et al. 2013; Stamos et al. 2013);
- restaurar aquíferos sobreexplorados por períodos prolongados de forma a se alcançar sua sustentabilidade (Brown & Keys 1985; Picot-Colbeaux et al. 2013; Stamos et al. 2013);
- garantir o abastecimento em períodos de estiagem (Goldshmid 1974; Monteiro 2013; Picot-Colbeaux et al. 2013);
- armazenar água local ou importada para servir como reservatório regulador do aquífero (Goldshmid 1974);
- melhorar a qualidade da água de aquíferos naturalmente com problemas de qualidade (com elevado TDS natural) ou contaminados pela ação humana (Picot-Colbeaux et al. 2013; Salo, Harrison & Archibald, 1986; Stamos et al. 2013);
- reverter a intrusão ativa da cunha salina e a contaminação criando barreiras hidráulicas apropriadas (Aberbach 1967; Berger & Gientke 1998);
- reativar nascentes que sofreram colapso por inversão do fluxo subterrâneo ou pela impermeabilização das áreas de recarga;
- diminuir o volume de escoamento superficial para minimizar os impactos do excedente das águas pluviais, incluindo erosão e assoreamento dos corpos receptores;
- diluir águas do aquífero controlando a salinidade em zonas agrícolas ou áreas que sofreram contaminação por diferentes fontes (ex. nitrato em áreas urbanas sem coleta e tratamento dos efluentes);
- controlar a subsidência do solo por excesso de bombeamento. Os processos de afundamento do solo incluindo solapamentos e subsidências são comumente relacionados às elevadas taxas de bombeamento dos aquíferos que rebaixam a superfície potenciométrica com consequente acomodação da superfície do terreno;
- misturar águas de diferentes qualidades de forma a se proporcionar o tratamento *in situ* por diluição de

substâncias naturalmente presentes no aquífero ou de contaminantes (Stamos et al., 2013);

- estabilizar a composição química, o pH e a temperatura da água.

3.2 Viabilidade de Implantação de técnicas de Recarga Artificial

Os trabalhos pioneiros sobre aplicação de técnicas de recarga artificial realizados no Brasil são atribuídos a Cadamuro (2002), Cadamuro, Campos & Tröger (2002) e Cadamuro & Campos (2005) visando à recarga de aquíferos em condomínios horizontais no Distrito Federal.

Foram testadas duas técnicas distintas de recarga artificial, com injeção direta e indireta de água no aquífero fraturado. A recarga indireta é realizada por caixas de recarga rasas, através da zona não saturada do aquífero freático, enquanto a recarga direta é direcionada para as fraturas dos aquíferos, através de um poço de injeção com 180 metros de profundidade.

Os resultados alcançados na prática de recarga indireta sugerem que as técnicas aplicadas possibilitam aumento da disponibilidade hídrica, com o incremento das áreas de recarga e minimização dos efeitos da impermeabilização do local, funcionando como importante ferramenta para a gestão dos recursos hídricos da região. Um dos resultados mostra que o poço de observação situado na porção mais baixa do terreno sempre se manteve com o nível d'água mais elevado após início da injeção de água, indicando que se formou um "cone de ascensão" nas adjacências do principal sistema de recarga.

Cadamuro (2002) também testou um sistema direto de injeção em poço tubular profundo. Os experimentos utilizaram água potável com injeção direta e passiva que mostraram que a transmissividade dos quartzitos e metarritmitos não é suficiente para se alcançar resultados minimamente satisfatórios. Almeida (2011) trabalhou na região de Caldas Novas e mostrou que a injeção passiva direta é viável naquela região.

Sendo assim, a recarga artificial na região dos cerrados deve ser preferencialmente, processada a partir de solos, e não diretamente no maciço rochoso. Em diferentes situações pedológicas e geomorfológicas as águas injetadas nos solos deverão alimentar os aquíferos fraturados subjacentes, de forma análoga ao que ocorre naturalmente. Quanto maior o volume de água infiltrada na zona não saturada (solos) maior será a recarga dos meios fraturados em profundidade, os quais representam os principais aquíferos em termos de volume para exploração e de proteção natural.

A análise da viabilidade de implantação de recarga artificial deve ser realizada em função dos tipos de solos e de rocha presentes na área em que os projetos serão desenvolvidos.

3.2.1 Viabilidade em função dos Tipos de Solos

Para efeito desta avaliação, os solos devem ser reagrupados em três categorias a partir dos seguintes critérios: solos espessos com textura argilosa a muito argilosa; solos espessos com textura média a arenosa e solos rasos ou pouco espessos. Na primeira classe estão inseridos os latossolos derivados de rochas mais ricas em quartzo (granitos e quartzitos). O segundo grupo inclui latossolos derivados de rochas argilosas, além de argissolos e nitossolos derivados de rochas carbonáticas e pelíticas. O terceiro conjunto é integrado por cambissolos e neossolos litólicos, além de gleissolos e plintossolos.

No caso dos solos espessos a textura não deve ser o único aspecto avaliado, sendo a estrutura uma propriedade fundamental no controle do funcionamento hídrico das coberturas pedogenéticas e de sua favorabilidade à recarga. Os latossolos, de forma geral, apresentam estrutura granular nos horizontes superficiais (A e A/B) e estrutura grumosa em maiores profundidades. Como o processo de recarga artificial deverá se processar a maiores profundidades, a estrutura grumosa é a mais importante para a avaliação da eficiência ou viabilidade da infiltração.

Latossolos de textura média são duplamente favorecidos com relação ao potencial de infiltração: apresentam grãos simples de quartzo com tamanho areia fina a média, além da estruturação granular comum nos horizontes superficiais e estrutura grumosa em maiores profundidades.

Os argissolos e nitossolos, apesar de apresentarem gradiente textural (incremento de argila total no horizonte B a partir do horizonte A) são fortemente estruturados em estrutura granular média a grande comum. Este caráter físico resulta em condições bastante favoráveis à infiltração de águas na zona não saturada dos horizontes.

Os solos rasos que ocupam áreas de maior declividade, incluindo cambissolos, neossolos e plintossolos compõem um grupo com condutividade hidráulica com ordem de grandeza 10^{-7} m/s ou menor, com tendência de diminuição progressiva conforme o aumento da profundidade no horizonte C.

Os solos hidromórficos com elevado grau de deficiência de drenagem, incluindo gleissolos, organossolos e espodossolos não devem ser submetidos a processos de recarga artificial, pois de forma geral representam zonas de descarga dos aquíferos e por serem associados a ambientes sensíveis do ponto de vista ambiental (em muitos casos sua ocupação é vedada pela legislação).

A integração dos dados deve ser espacializada em um mapa de viabilidade para recarga artificial dos aquíferos freáticos, o qual deve apresentar três classes com relação ao potencial ou à viabilidade de instalação de projetos de recarga artificial dos aquíferos. A classe de Elevada

Viabilidade é caracterizada em função da estatística de valores de condutividade hidráulica da zona não saturada entre 10^{-5} a 10^{-6} m/s. A classe de Moderada Viabilidade é associada a latossolos argilosos e solos podzolizados com condutividade hidráulica variável entre 10^{-6} e 10^{-7} m/s. A classe de Baixa Viabilidade ou inviável envolve cambissolos e neossolos litólicos com condutividades hidráulicas menores que 10^{-7} m/s podendo alcançar valores da ordem de 10^{-9} m/s. Nesta classe os locais com solos muito rasos em áreas de relevo com declividades maiores que 30% são considerados inviáveis para projetos de recarga artificial.

3.2.2 Viabilidade em função dos Tipos de Rochas

A recarga pode ser realizada diretamente em rochas carbonáticas (aquíferos cársticos) e em rochas arenosas (aquíferos intergranulares) e sua viabilidade depende da transmissividade destes aquíferos. De forma geral a recarga direta é viável em aquíferos com transmissividade igual ou superior a 10^{-4} m²/s.

Com relação aos aquíferos fraturados, de forma geral não é possível desenvolver recarga direta em sua zona saturada, sendo apenas possível a recarga indireta a partir dos solos de cobertura. Apenas casos específicos, em sistemas com valores de transmissividades anômalas a recarga direta é viável, como no caso de Caldas Novas, no estado de Goiás (Almeida 2011).

A avaliação associada à efetividade dos tipos de rochas com relação aos processos de recarga deve ser vista de forma integrada, pois na maior parte dos casos, o substrato rochoso funciona de forma passiva aos processos de infiltração de águas que percolam a partir das coberturas de solos.

3.3 Proposição de Técnicas de Recarga Aplicadas para a Região dos Cerrados

Para a região dos cerrados três métodos de infiltração são propostos, sendo os sistemas denominados de caixas de recarga, trincheiras de recarga e calhas de recarga. Os três sistemas são similares, sendo que as diferenças básicas são relacionadas às formas e dimensões de cada estrutura. Todos os sistemas de estruturas para indução da infiltração das águas de chuva deverão ser preenchidos com material permeável (materiais com elevada condutividade hidráulica) para induzir a infiltração.

A alimentação dos sistemas deve ser realizada por água de chuva recolhida das coberturas das edificações nos meses com maior índice pluviométrico. As análises de águas de chuva mostram que apenas nas primeiras precipitações a água contém valores mais elevados de sais dissolvidos. Este fato é devido à descarga de particulados e gases de combustão acumulados na atmosfera depois de um longo

período sem precipitações. No momento em que as chuvas se regularizam as águas se tornam extremamente puras com total de sólidos dissolvidos menor que 5 mg/l. O balanço químico ao considerar as primeiras chuvas e o elevado volume de águas ao longo do período chuvoso mostra que não há qualquer risco de contaminação dos aquíferos a partir do uso de águas de precipitação.

O uso de água de precipitação pluvial visa aproveitar o excedente hídrico das precipitações, principalmente entre os meses de novembro a março. Como resultado tem-se, ainda, a diminuição do escoamento superficial com ganhos evidentes em todo o sistema de drenagem urbana. As águas devem ser coletadas a partir de coberturas de edificações. Sistemas de telas nas entradas das tubulações de coleta da água devem ser instalados com o objetivo de reter folhas e outras partículas menores que se acumulam nos telhados, principalmente nos períodos secos do ano. Estes materiais devem ser periodicamente retirados para evitar entupimento da tubulação adutora. Alternativamente, um sistema de retenção pode ser instalado na entrada dos sistemas de infiltração.

Estas propostas, se bem orientadas e implantadas, resultam em vários efeitos positivos ao meio ambiente, nos quais se destacam: diminuição do volume de escoamento de águas pluviais e aumento da disponibilidade de água subterrânea, com a consequente perenização de nascentes e ampliação das reservas renováveis dos aquíferos submetidos a exploração.

Para maximizar a eficiência do processo, deverá ser construída uma caixa em cada lote de área residencial ou mais de um sistema em regiões de áreas institucionais (escolas, áreas públicas, etc.), sendo o local mais apropriado definido em função da distribuição das edificações e instalações civis dentro do lote. Os sistemas de recarga devem ser construídos preferencialmente nas áreas verdes (geralmente áreas com coberturas de grama), o mais afastado possível de qualquer edificação.

3.3.1 Caixas de Recarga

O sistema deve ser composto por uma calha que capte as águas de chuva que precipitam sobre os telhados e por um tubo de PVC que as direcione para as caixas de infiltração. Estas devem ser construídas de forma que mantenha uma distância mínima de três metros das edificações (casas e muros) para evitar riscos geotécnicos às fundações. Em locais em que não há coleta e tratamento de esgotos as caixas devem ser preferencialmente instaladas com a máxima distância do sistema de fossa-sumidouro.

A construção do sistema deve seguir os seguintes passos (Figura 2): **i)** escavação manual de uma caixa com padrão cilíndrico com 1 metro de diâmetro e de 1 metro a 2,5 metros de profundidade (similar à porção superior

de uma cisterna ou cacimba); **ii)** perfuração, com auxílio de trado manual, de um furo vertical a partir do fundo da caixa já aberta; **iii)** preenchimento de todo o espaço por cascalho grosso composto de seixos arredondados de quartzo e quartzito (cascalho de rio); **iv)** acoplar a tubulação oriunda das calhas que captam águas das coberturas das edificações (preferencialmente tubos de PVC de 100 mm de diâmetro) e **v)** instalar o acabamento da caixa de recarga. Este acabamento pode ser feito em diferentes formatos, incluindo: instalação de um anel de manilha de concreto com tampa, também em concreto, cobertura com tecido geotêxtil, conhecido como bidim, adição de solo e plantio de grama, uso de uma grade metálica (neste caso é necessário cobrir o fundo da grade com uma manta de bidim para evitar a entrada de particulados no sistema). O acabamento com uma tampa de concreto é o mais indicado, de forma a se evitar a entrada de material que possa promover a diminuição da porosidade do cascalho de preenchimento.

O sistema de caixas de recarga deverá ser aplicado para casos de residências unifamiliares em que a área máxima de captação da cobertura seja de 200 m² (caso a área de cobertura seja maior apenas deve ser direcionado para cada caixa uma área de 200 m²). Esta limitação visa minimizar eventuais riscos geotécnicos, principalmente erosão e colapso interno de paredes.

A profundidade mínima, do nível freático, desejável para aplicação deste sistema de recarga é de 6 metros, sendo que cerca de 4 metros de zona vadosa são importantes para manutenção da função filtro do aquífero.

3.3.2 Trincheiras de Recarga

Para os locais em que ocorrem solos pouco permeáveis um sistema de infiltração horizontal é proposto. Neste caso, propõe-se a instalação de trincheiras de infiltração que devem ter as seguintes dimensões: 50 a 80 cm (profundidade) por 50 cm (largura) por 200 a 300 cm (comprimento) (Figura 3). As dimensões exatas devem ser determinadas para cada caso em função da disponibilidade de espaço, da área de cobertura a ser captada e das características dos solos.

A instalação das trincheiras deve seguir os seguintes passos construtivos:

- i) abertura manual da trincheira (manter a distância mínima de fundações e outras edificações);
- ii) preenchimento da trincheira por cascalho lavado com seixos grossos a muito grossos (diâmetro maior que 20 mm);
- iii) instalação da tubulação adutora da água captada nos telhados e direcionada para a trincheira de infiltração. Neste caso a tubulação deverá ser distribuída por, no mínimo, dois tubos de 50 mm cada, de forma que a água entre na trincheira em diferentes pontos; e

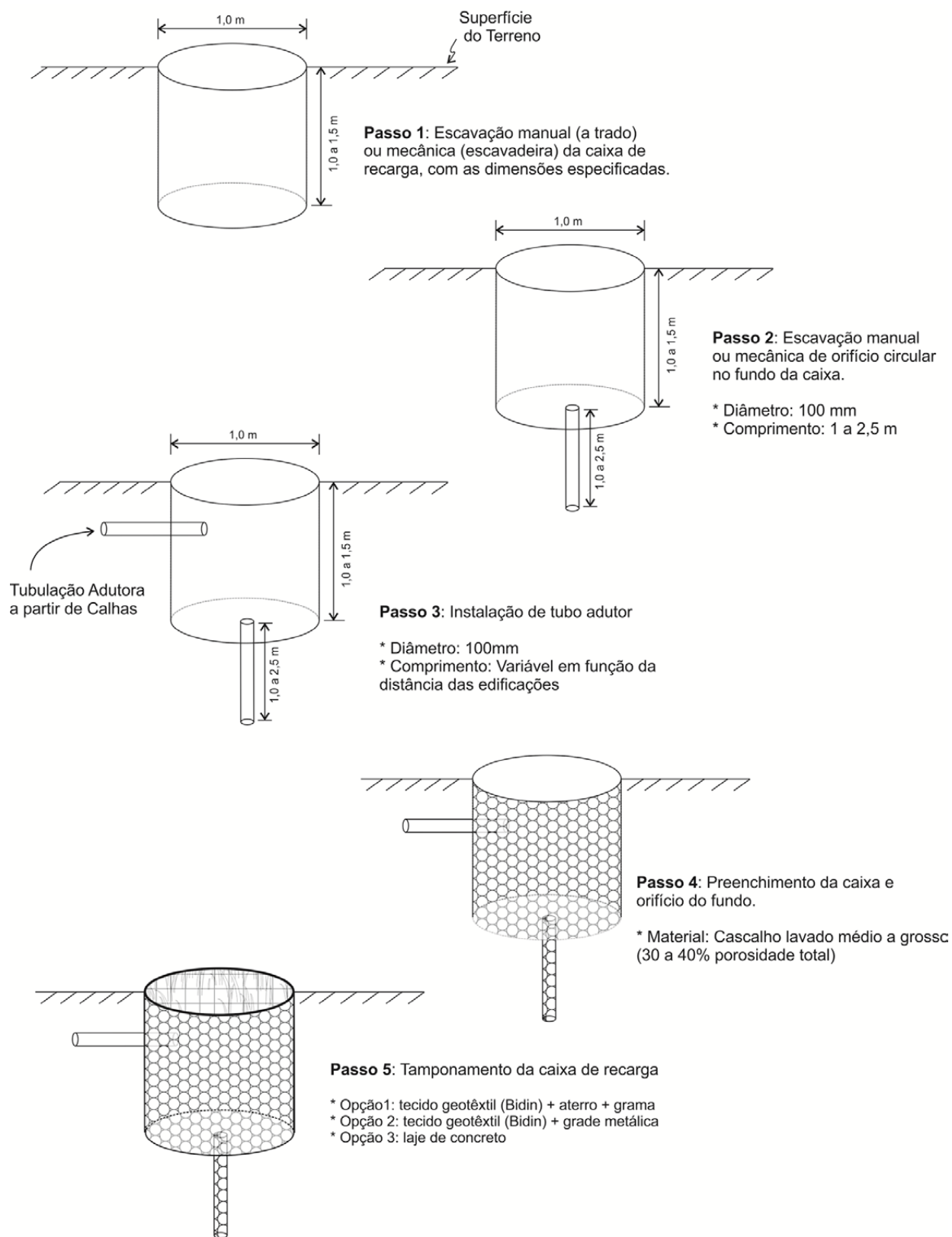


Figura 2 Sistema de caixa de recarga artificial proposto para locais em que ocorrem latossolos e outros solos permeáveis com nível freático a profundidade maior que 6 metros.

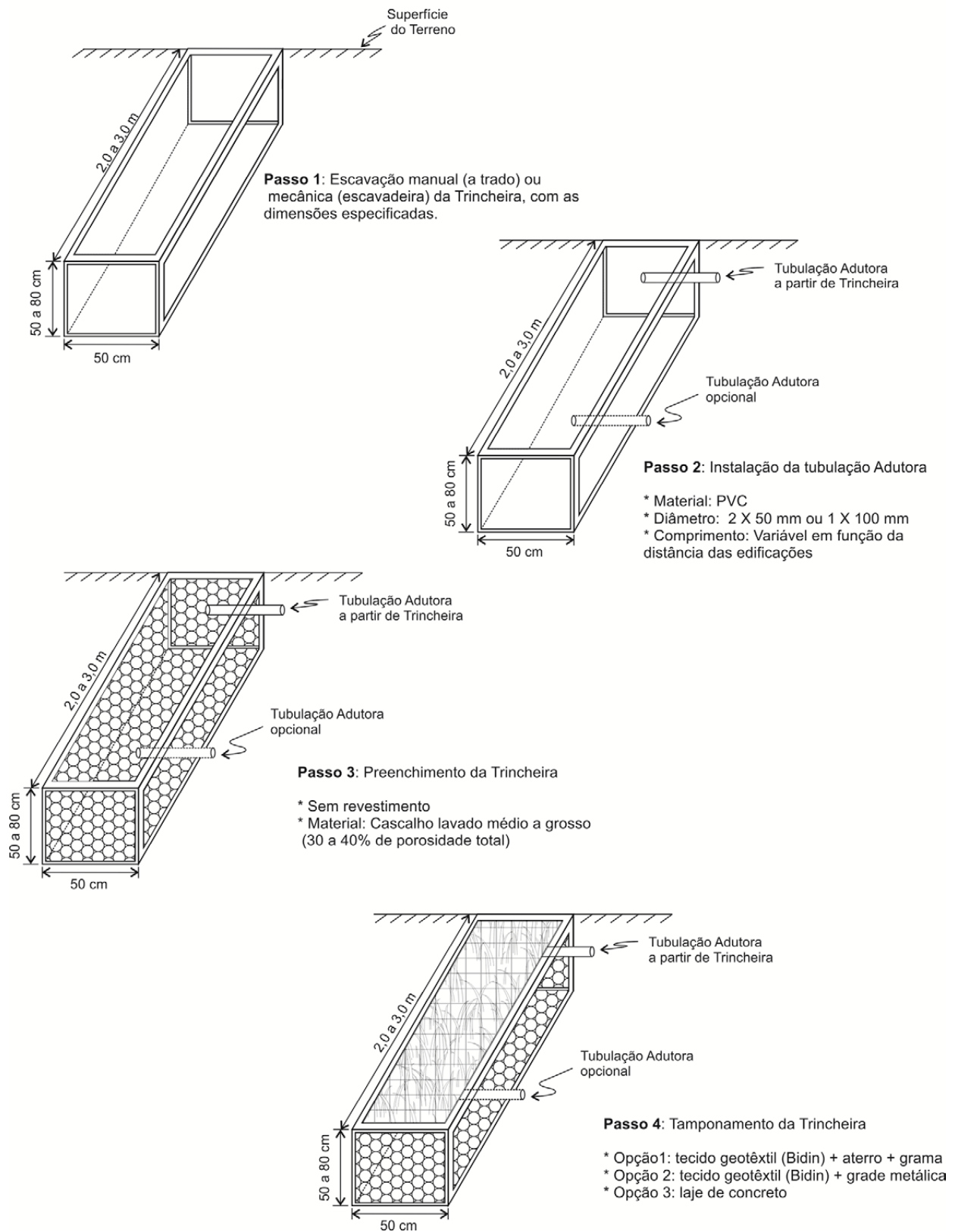


Figura 3 Sistema de trincheira de recarga artificial proposto para locais em que ocorrem solos rasos e pouco permeáveis com nível d'água mais profundo que 3 metros.

- iv) instalação do acabamento que pode ser por grade metálica, laje de concreto ou por plantio de grama. Em todos os casos deve-se utilizar uma manta de bidim entre o topo do cascalho de preenchimento e a base do acabamento.

Da mesma forma que o sistema anteriormente descrito, as trincheiras devem ser preenchidas por cascalho grosso quartzoso. As águas oriundas de coberturas de residências devem ser direcionadas para o sistema de infiltração. A área máxima de cobertura que deve ser captada e revertida para cada trincheira não deve ser superior a 120 m².

Neste caso, a infiltração se dá em grande parte na horizontal, e mesmo que não se espere um amplo volume de infiltração, os resultados com relação ao ciclo hídrico como um todo justificam sua implantação.

O sistema de trincheiras de recarga deve ser aplicado para casos de solos menos permeáveis com profundidade de nível freático máxima da ordem de 3 metros. Os dois metros mínimos entre o fundo da trincheira e a superfície freática são necessários para manutenção da função filtro da zona não saturada do aquífero intergranular.

3.3.3 Calhas de Recarga

Para os locais em que existem solos espessos com condutividade hidráulica da ordem de 10⁻⁶ m/s ou maior é proposta a instalação de calhas de recarga. Este sistema é apenas aplicável para grandes áreas de coberturas em que existam amplas áreas verdes entre as edificações (exemplo: galpões, prédios de escolas, prédios públicos, etc.).

As calhas de recarga devem ter os seguintes atributos dimensionais e construtivos (Figura 4):

- i) profundidade de 1,2 a 2 metros, por 0,75 a 1 metro de largura e de 3 a 5 metros de comprimento. As dimensões devem ser determinadas para cada caso em função das características dos solos, da área de cobertura e da área livre para instalação;
- ii) o fundo e as paredes laterais da trincheira devem ser revestidos por bidim a fim de evitar a colmatagem das argilas e eliminar o risco de desenvolvimento de erosão subterrânea com a eliminação de argila e silte do solo. Neste tipo de sistema o volume de água que é inserido no meio é grande e os riscos de queda de blocos, de desenvolvimento de erosão subterrânea e demais problemas geotécnicos são mais elevados;
- iii) todo o seu volume deve ser preenchido por cascalho grosso a muito grosso (diâmetro de 2 a 3 cm)

composto de seixos de quartzito (cascalho lavado de aluvião). Este material deve ser bem selecionado, com ausência de matriz de forma a se garantir uma porosidade final, mesmo após seu adensamento, da ordem de 35 a 40%;

- iv) a adução da água a partir das áreas de cobertura deverá ser distribuída e entrar, em pelo menos, três pontos no interior das calhas. Esta ação objetiva maximizar a capacidade de infiltração e facilitar a saída do ar que preenche a porosidade;
- v) tampa de laje de concreto ou grade metálica. No caso de uso de grade metálica, uma manta de bidim removível deve ser instalada sobre os seixos para possibilitar a retirada periódica de material particulado e resíduos sólidos acumulados;
- vi) na porção superior deve-se instalar um tubo de 50 mm de diâmetro com saída para a rede pública de águas pluviais (para dar segurança ao sistema para casos de eventos de chuvas anômalas > 70 mm/h).
- vii) as entradas d'água devem ser no mínimo duas, sendo preferencialmente mais de duas, de forma que o afluxo durante os picos de precipitação mais intensos seja distribuído ao longo de toda a calha de infiltração.

4 Conclusões

Os sistemas de recarga propostos são viáveis e foram previamente instalados e testados e, em alguns casos, já foram monitorados tendo sua efetividade verificada. A instalação de caixas e trincheiras de recarga é simples, e não requer amplo conhecimento técnico, mas apenas a verificação da logística do local, com a verificação do solo a ser escavado, sistema de adução da água captada a partir de cobertura de edificações e dimensão mínima da caixa ou trincheira.

A instalação dos diferentes sistemas de infiltração deve ser realizada o mais distante possível de edificações e outras obras civis (muros, fundações, calçadas, etc.) de forma a se minimizar eventuais riscos geotécnicos.

Os sistemas apresentam baixo custo, sendo que as calhas de recarga por serem sistemas maiores e requerem revestimento das paredes e fundo da perfuração no solo são mais onerosas. Para a instalação dos demais sistemas os itens mais caros são representados pelas calhas e tubulação para adução da água e pelo material de preenchimento das perfurações nos solos.

Diferentes sistemas de recarga devem ser implantados para diferentes tipos de solos, contextos de relevo e profundidades do nível freático. As diretrizes devem incluir:

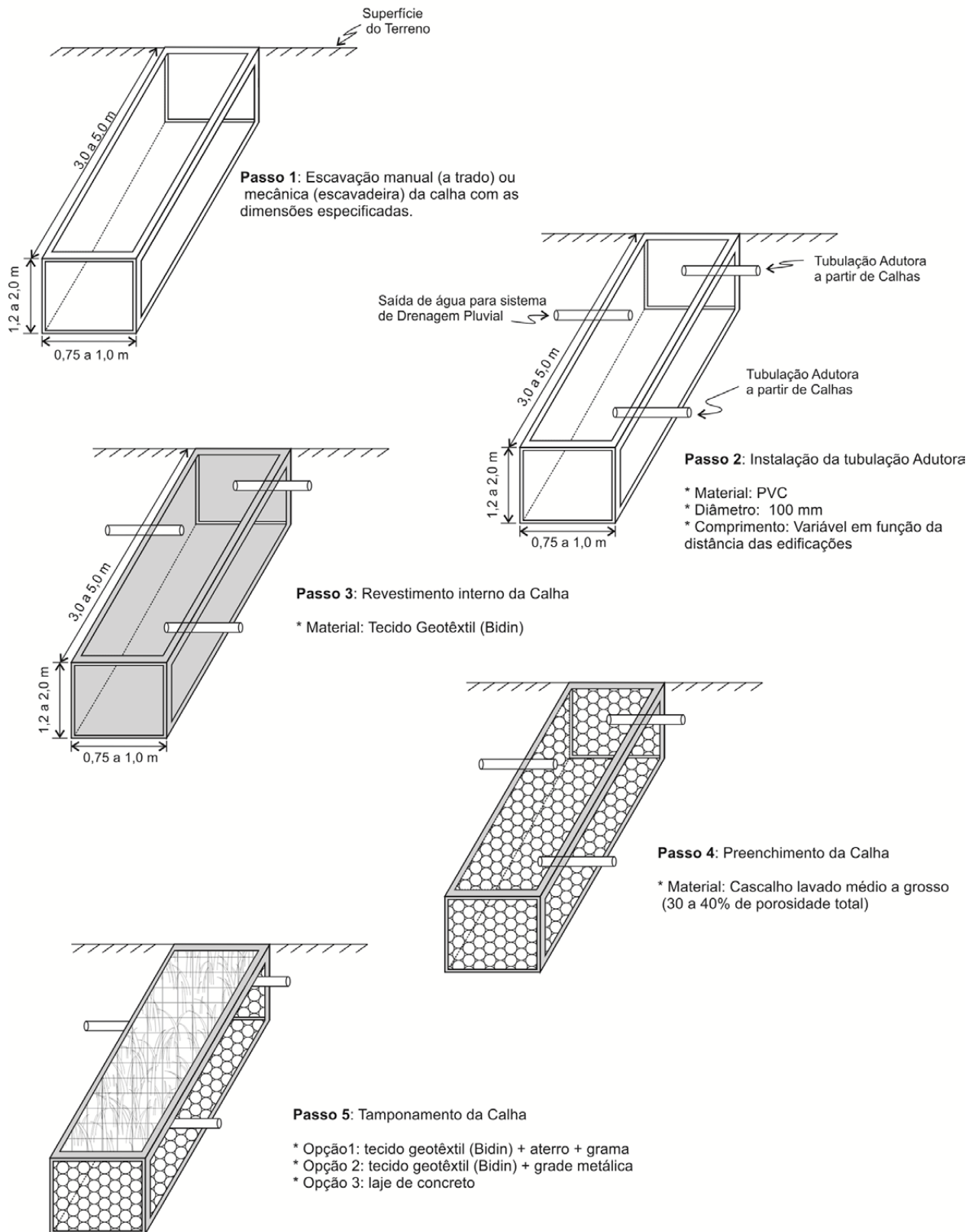


Figura 4 Sistema de calha de recarga artificial proposto para locais com ampla área de cobertura das edificações e em que ocorrem solos espessos e permeáveis com nível freático mais profundo que 6 metros.

- Sistema de Caixa de Recarga: aplicável para locais com solos espessos e permeáveis (condutividade hidráulica mínima da ordem de 10^{-6} m/s), em locais de relevo plano a suave ondulado (declividade menor que 4%), níveis d'água mais profundos que 6 metros, para infiltração de águas coletadas em coberturas de no máximo 200 m² e instaladas em pontos a pelo menos 3 metros de qualquer tipo de edificação. A situação comum que contempla todas as condicionantes é sintetizada pelos locais em que ocorrem latossolos, argissolos ou nitossolos.
- Sistema de Trincheira de Recarga: este sistema de indução da infiltração é adequado para locais com solos rasos ou pouco espessos, com condutividade hidráulica da ordem de 10^{-7} m/s, em locais com relevo ondulado, para infiltração de áreas cobertas de no máximo 120 m², com níveis d'água mais profundos que 3 metros, devendo ser construídos no mínimo a 3 metros de qualquer edificação. A condição de aplicação das trincheiras de recarga é tipicamente encontrada nas áreas de ocorrência de cambissolos. Para minimizar riscos de desenvolvimento de erosão subterrânea a dimensão da trincheira deverá ser inversamente proporcional à declividade do terreno em seu local de instalação.
- Sistema de Calha de Recarga: para sua aplicação devem ser consideradas as mesmas condições para o sistema de caixas de recarga, entretanto, a distância mínima das edificações deve ser de 5 metros ou mais se existirem pavimentos em subsolo. Outra diferença é que o sistema de calha de recarga poderá ser dimensionado para grandes áreas de cobertura, sendo indicada uma calha para cada 200 m² de área coberta. No caso de se utilizar calhas com comprimento maior que 2,5 metros, as entradas de água oriundas das coberturas deverão ser distribuídas por mais de uma tubulação.

A recarga artificial na região dos cerrados pode ser uma poderosa ferramenta para a gestão dos recursos hídricos. A sazonalidade climática observada neste ambiente amplia a eficiência dos sistemas de infiltração, uma vez que as perdas por escoamento superficial é diminuída em função da existência dos sistemas de infiltração. Outro aspecto que favorece a efetividade dos sistemas propostos é vinculado à presença de latossolos como cobertura de solo predominante nas áreas de cerrados.

Com relação aos custos para implantação dos sistemas de recarga artificial propostos podem ser considerados os seguintes valores de referência: R\$ 2.500,00; R\$ 1.250,00 e R\$ 4.000,00, respectivamente, para os sistemas de caixa, trincheira e calha de recarga. Contudo, a variação pode ser considerável em função do comprimento da calha,

da distância entre a captação pelas calhas e o sistema de infiltração, das dimensões do sistema instalado e do preço local do m³ de cascalho. O valor de instalação das calhas e tubulações adutoras é o mais elevado, entretanto a maior parte das residências unifamiliares e outras modalidades de obras civis já apresentam sistemas de calhas para captação e disciplinamento das águas pluviais. Neste caso, ao contrário de enviar as águas para os sistemas de drenagem pluvial, parte da água captada é direcionada para os sistemas de infiltração e recarga.

5 Referências

- Aberbach, S.H. 1967, 'Review of Artificial Ground-Water Recharge in the Coastal Plain of Israel', *International Association of Scientific Hydrology Bulletin*, vol. 12, no. 1, pp. 65-77.
- Adámoli, J., Macedo, J., Azevedo, L.G. & Netto, J.M. 1987, 'Caracterização da região dos cerrados' in: W.J. Goedert (ed.), *Solos dos Cerrados: Tecnologias e Estratégias de Manejo*, Planaltina: Embrapa/CPAC, São Paulo, pp. 33-98.
- Almeida, L. 2011, 'Estudo da Aplicabilidade de Técnicas de Recarga Artificial para a Sustentabilidade das Águas Termais da Região de Caldas Novas- GO', Tese de Doutorado, Universidade de Brasília.
- Berger, S.G. & Gientke, F.J. 1998, 'Seawater Intrusion Reversed Through Artificial Recharge Beneath the Oxnard Plain, California', *3th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater*, Amsterdam, Netherlands, pp. 3-9.
- Bouwer, H. 2002, 'Artificial Recharge of Groundwater: Hydrogeology and Engineering', *Hydrogeology Journal*, vol. 10, pp.121-142.
- Brown, R.F. & Keys, W.S. 1985, *Effects of Artificial Recharge on the Ogallala Aquifer*, U.S. Geological Survey Water-Supply Paper, 2251, Washington, D.C. 56p.
- Cadamuro, A.L.M. 2002, 'Proposta, Avaliação e Aplicabilidade de Técnicas de Recarga Artificial em Aquíferos Fraturados para Condomínios Residenciais do Distrito Federal', Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília.
- Cadamuro, A.L.M., Campos, J.E.G. & Tröger, U. 2002, 'Artificial Recharge in Fractured Rocks? An Example from the Federal District of Brazil for the Sustainability of the System', *4th International Symposium on Artificial Recharge*, Adelaide, Austrália, pp. 523-526.
- Cadamuro, A.L.M. & Campos, J.E.G. 2005, 'Recarga Artificial de Aquíferos Fraturados no Distrito Federal: uma ferramenta para a gestão dos recursos hídricos', *Revista Brasileira de Geociências*, vol. 35, pp. 89-98.
- Campos, J.E.G. 2004, 'Hidrogeologia do Distrito Federal: Subsídios para a Gestão de Recursos Hídricos Subterrâneos', *Revista Brasileira de Geociências*, vol. 1, pp. 41-48.
- Diamantino, C. 2005, 'Metodologias de Recarga Artificial de Aquíferos', *7º Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa*, Évora, Portugal, pp. 1-15.
- Díaz, J.M.M., Gomez, J.A.O., Armayor, J.L. & Catano, S.C. 2000, *Recarga Artificial de Aquíferos. Síntesis Metodológica*.

- Estudios y Actuaciones Realizadas en la Provincia de Alicante*, Instituto Geológico y Minero de Espanha, <<http://aguas.igme.es/igme/libros2.htm>>. Acesso em 06 Junho 2020.
- Dillon, P. 2005 'Future Management of Aquifer Recharge', *Hydrogeology Journal*, vol. 13, pp. 313-316.
- Eiten, G. 1994, 'Vegetação do Cerrado', in: Novaes Pinto (ed.), *Cerrado: Caracterização, Ocupação E Perspectivas*, 2nd edn, UnB/Sematec, Brasília, pp. 9-65.
- Fetter, C.W. 2003, *Applied Hydrogeology*. 4th edn, Prentice-Hall, Ney Jersey.
- Gale, I., Neumann, I., Calow, R. & Moench, M. 2002, *The Effectiveness of Artificial Recharge of Groundwater: a review*. Groundwater Systems and Water Quality Program Final report cr/02/108n. British Geological Survey. Keyworth, Nottingham.
- Goldshmid, J. 1974, 'Water-Quality Aspects of Ground-Water Recharge in Israel', *American Water Works Association*, vol. 66, no. 3, pp. 163-166.
- IBGE. 2021. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Mapa de vegetação do Brasil. disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 08/01/2021.
- Justino, E.A. 2003, 'Estudo do Controle do Escoamento Superficial com o Uso de Reservatório de Retenção na Bacia do Córrego Lagoinha, município de Uberlândia – MG', Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia.
- Katzer, T. & Brothers, K. 1989, 'Artificial Recharge in Las Vegas Valley, Clark County, Nevad', *Ground Water*, vol. 27, no. 1, pp. 50-56.
- Loucks, D.P. 2000, 'Sustainable Water Resources Management', *Water International*, vol. 25, pp.13-23.
- Matthews, C. 1991, 'Using Ground Water Basins as Storage Facilities in Southern California', *Water Resources Bulletin*, vol. 17, no. 5, pp. 841-847.
- Monteiro, R.D. 2013. 'Avaliação de Recursos Hídricos e Viabilidade da Recarga Artificial de Aquíferos na Bacia Hidrográfica dos Engenhos na Ilha de Santiago - Cabo Verde', Dissertação de Mestrado, Universidade NOVA de Lisboa.
- Moura, A.N. 2004, 'Recarga Artificial de Aquíferos: Desafios e Riscos para Garantir o Suprimento Futuro de Água Subterrânea', XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, São Paulo, Brasil, pp. 1-19.
- Nimer, E. 1989. *Climatologia do Brasil*. IBGE, Rio de Janeiro.
- Picot-Colbeaux, G., Thiéry, D., Sarah, S., Boisson, A., Pettenati, M., Perrin, J., Dewandel, B., Maréchal, J.C., Ahmed, S. & Kloppmann, W. 2013, 'Modeling Artificial Recharge Capacity of Fractured Hard Rock under Semiarid Conditions in Southern India: Implementing Storage Basin Dynamics into MARTHE Code', 8^o *International Symposium on Managed Aquifer Recharge: Meeting The Water Resource Challenge*, China, pp. 15-19.
- Ribeiro, J.F. & Walter, B.M.T. 1998, 'Fitofisionomias do Bioma Cerrado' in: S.M. Sano & S.P. Almeida (eds.), *Cerrado: Ambiente e Flora*. Embrapa-CPAC, Brasília, pp. 89-166.
- Roseiro, C.M.S.D. 2009, 'Recarga Artificial de Aquíferos: Aplicação ao Sistema Aquífero da Campina de Faro, Lisboa-Portugal', Tese de Doutorado, Universidade de Lisboa.
- Salo, J.E.D., Harrison, D. & Archibald, E.M. 1986, 'Removing Contaminants by Groundwater Recharge Basins', *Journal American Water Works Association*, vol. 78, no. 79, pp. 76-81.
- State-of-the-Art of Water Supply Practices 2006, *Southeastern Wisconsin Regional Planning Commission*, Technical Report N.º 43, Chapter VI – Artificial Groundwater Recharge and Management. Acesso em 06 junho 2020, <http://www.sewrpc.org/SEWRPCFiles/Publications/TechRep/tr-043_water_supply_practices.pdf>.
- Stamos, C.L., Martin, P., Everett, R.R. & Izbicki, J.A. 2013, *The Effects of Artificial Recharge on Groundwater Levels and Water Quality in the West Hydrogeologic Unit of the Warren Subbasin, San Bernardino County, California*, Scientific Investigations Report.
- Villaroya, F. & Adwell, C.R. 1998, 'Sustainable Development and Groundwater Resources Exploitation', *Environmental Geology*, vol. 34, no. 2/3, pp. 111-115.

Recebido em: 21/06/2020

Aprovado em: 07/02/2021

How to cite:

Campos, J.E.G.; Rodrigues, D.S.; Rocha, A.B.A.; & Gonçalves, T.D. 2021. Diretrizes para Implantação de Recarga Artificial de Aquíferos no Domínio dos Cerrados do Brasil. *Anuário do Instituto de Geociências*, 44: 35827. DOI 1982-3908_2021_44_35827