RECARGA ARTIFICIAL DE AQUIFEROS FRATURADOS NO DISTRITO FEDERAL: UMA FERRAMENTA PARA A GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS

ANDRÉ LUIZ DE MOURA CADAMURO¹ & JOSÉ ELOI GUIMARÃES CAMPOS²

Resumo Essa pesquisa foi desenvolvida no condomínio residencial Alto da Boa Vista, onde está prevista a ocupação de 20.000 habitantes em 6,9 km² de área. Tal condomínio situa-se numa região de recarga natural do mais importante aquífero do Grupo Paranoá no Distrito Federal. Da área total a ser ocupada, 3,8 km² serão impermeabilizados, por meio de ruas, calçamentos e telhados, o que implicará numa perda de 35,5% na recarga dos aquíferos constituídos pelo manto de intemperismo e, conseqüentemente, numa perda de 56% na recarga dos aquíferos fissurais subjacentes. Outro fato agravante dessa situação é a forma prevista para o abastecimento público de água, baseado na exploração de doze poços tubulares profundos. Levando em conta toda a área das bacias hidrográficas nas quais o condomínio está situado e considerando o consumo médio de água na região, caso toda área venha a ser ocupada, a demanda d'água no condomínio será o dobro do volume disponível à recarga sob condições naturais. Essa situação, certamente, levaria o sistema à condição de sobreexploração, comprometendo a sustentabilidade das reservas hídricas exploradas. Entretanto, as condições climatológicas da região favorecem a utilização da água da chuva para maximizar a recarga nos aquíferos fissurais locais. Nesse contexto, duas técnicas de recarga artificial foram aplicadas e testadas *in situ*, por meio da construção de sistemas experimentais baseados na utilização da água de precipitação pluvial. A água, captada em calhas instaladas nos telhados das residências, é conduzida para recarga a partir de caixas de infiltração no solo (sistema indireto) e poço tubular profundo de injeção (sistema direto). Baseado em testes experimentais simulando eventos extremos de precipitações pluviométricas e na comparação de balanços hidrológicos, considerando diferentes condições de urbanização da área estudada, foi possível avaliar a eficiência dos sistemas experimentais. O sistema indireto de recarga artificial apresenta alta eficiência e baixo custo, com o uso da caixa de infiltração sem revestimento e preenchida por seixos de quartzo. Numa situação de ocupação, utilizando-se esse sistema, a recarga será até 150% superior à recarga sem a utilização desse sistema e 10% superior à recarga sem a ocupação urbana, pois há uma diminuição significativa das perdas existentes em condições naturais. Esse sistema será útil para a manutenção do equilíbrio dinâmico nos aquíferos fissurais e garantirá sua utilização sustentável transformando-se numa importante ferramenta de gestão dos recursos hídricos locais.

Palavras-chaves: recarga, recarga artificial, aquífero fissural, gestão de recursos hídricos.

Abstract This research was developed in the Alto da Boa Vista condominium area, where is expected the occupation of about 20,000 inhabitants, in an area of 6.9 km². Such condominium is located in an important region of natural recharge of one of the most important aquifers of the Paranoá Aquifer System in the Federal District. About 3.8 km² will be sealed, due to paved roads, roofs, and will cause a loss of 35.5% in the natural recharge of the porous aquifers, and 56% of the fractured underlying aquifers. The water public supply planned to this area is based on the groundwater exploitation of twelve deep wells. Considering the total area of the basins and the consumption of water in the region, if the total area is occupied, the water demand of the condominium alone would be twice the recharge of the fractured aquifer. This situation will certainly cause an excessive exploitation, comprising the sustainability and the water resources. However, the climatic conditions of region are favorable to the utilization of rainwater, captured on the roofs of the residences and carried to infiltration, to provide the recharge of the fractured aquifers in the area. In this context, two techniques of artificial recharge were applied and tested, using experimental system and rainwater. The rainwater captured by roof gutters was carried to four different types of cylindrical dug wells for recharge in the soil (indirect system) and to a deep injection well (direct system). Based on precipitation simulations, experimental tests and in a comparison of hydrologic water budgets, and considering different conditions of urbanization of the area, it was possible to evaluate the efficiency of the two systems. The best system evaluated was that presented by a cylindrical dug well filled with quartz gravel. This system can compensate the decrease of infiltration due to surface sealing and can help the sustainability of public water supply by aquifer exploration. The application of these techniques of artificial recharge is an important toll to water resources management.

Keywords: recharge, artificial recharge, fractured aquifer, water resources management.

INTRODUÇÃO Nos últimos 20 anos, o elevado crescimento populacional no Distrito Federal (DF), cuja população atual é quatro vezes maior que aquela esperada para o início deste século, foi responsável pela ocupação desordenada e, muitas vezes, irregular das principais áreas de recarga na região. Essas áreas têm importância tanto para a manutenção dos recursos hídricos subterrâneos, quanto para os superficiais. Nelas, a ocupação

territorial vem ocorrendo sob a forma de condomínios residenciais, onde a preservação de áreas verdes é insignificante, quando comparada à condição de pré-urbanização. Nos condomínios residenciais normalmente ocorre uma impermeabilização generalizada por meio de calçamentos, vias asfaltadas e coberturas de residências, que minimizam a recarga natural responsável pela manutenção do equilíbrio dinâmico dos aquíferos subjacentes e

1 - Gerência de Sistemas Rurais – TPDR, Empresa de Saneamento do Distrito Federal – CAESB, SCS quadra 2, edifício Cedro II, 2º andar, andrecadamuro@yahoo.com.br, CEP 70.000-000, Brasília, DF - Brasil.

2 - Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, eloi@unb.br CEP 70910-900, Brasília, DF – Brasil.

aumentam excessivamente o escoamento superficial, causando perdas significativas de excedente hídrico durante a estação chuvosa.

A área de estudo desta pesquisa localiza-se na porção centro-norte do Distrito Federal e abrange parte da área de recarga natural da Chapada da Canastra (Domo Estrutural de Sobradinho), correspondendo às áreas de recarga das bacias hidrográficas dos córregos Sobradinho e Sarandi. Nessa área está prevista a ocupação de um condomínio residencial denominado Alto da Boa Vista (CABV), situado à margem norte da BR - 020, sentido Brasília - Planaltina, km 12, 5 (Figura 1), na Região Administrativa de Sobradinho. Sua futura área de ocupação tem como característica um relevo típico de chapada elevada, que abrange 6,9 km² de terrenos favoráveis e muito favoráveis à recarga regional. Trata-se de uma região considerada sensível do ponto de vista hidrogeológico (Souza 2001). Após a urbanização, fazendo comparação entre balanços hídricos, é prevista uma perda de 35,5% na recarga dos aquíferos constituídos pelo manto de intemperismo e 56% na recarga dos aquíferos fraturados subjacentes, constituídos por quartzitos e metarritimitos arenosos do Grupo Paranoá.

Conforme Fetter (1994), o bombeamento de água subterrânea a uma taxa superior à taxa de recarga natural do aquífero, acarreta na sua exploração exacerbada, o que é conhecido como sobrexplotação de aquífero. Segundo Theis (1938) em condições naturais um aquífero está em equilíbrio dinâmico, ou seja, quando um determinado volume de água é descarregado, naturalmente através da recarga, um volume igual o reabastece. Por outro lado, em condições de sobrexplotação onde vários poços tubulares profundos retiram água de um aquífero, o cone de depressão resultante cresce, até que a descarga seja drasticamente reduzida, ou a recarga seja aumentada, isso para que uma nova condição de equilíbrio dinâmico, condicionada pela retirada d'água, seja alcançada. Desta forma, caso a soma do que sobrou como descarga e o total de água bombeado do aquífero exceda a recarga natural, o cone de depressão resultante não se estabilizará e o nível freático rebaixará continuamente ao longo do tempo de bombeamento.

No DF o fato dessas novas áreas de ocupação territorial não serem atendidas pela Empresa de Saneamento do Distrito Federal (CAESB) fez com que os condomínios residenciais buscassem seu abastecimento público de água nos aquíferos fraturados a partir de captações por poços tubulares profundos. Dessa forma, a relativo baixo custo, cada condomínio implantou seu sistema independente de distribuição de água potável, baseado unicamente na exploração de água subterrânea. Entretanto, a excessiva exploração desses aquíferos, concomitantemente com a impermeabilização da área vem ocasionando, nos últimos dez anos, um rebaixamento significativo nos níveis dinâmicos dos poços, levando os aquíferos à condição de sobrexplotação. Essa problemática tem incentivado várias pesquisas relacionadas aos recursos hídricos subterrâneos e superficiais do DF (Campos & Freitas-Silva 1998, Lousada 1999, Souza 2001, Joko 2002 e Cadamuro 2002).

Este trabalho mostra os resultados da pesquisa desenvolvida por Cadamuro (2002), onde duas técnicas de recarga artificial de aquíferos fissurais foram testadas no CABV. Dois sistemas experimentais foram construídos para o aproveitamento da água de precipitação pluvial visando à recarga artificial no Subsistema R_3/Q_3 Sistema Paranoá, (Campos & Freitas-Silva 1998). Um sistema indireto a partir de caixas de infiltração, e outro direto, com uso de poço tubular profundo de injeção. As condições climáticas do DF favorecem a utilização da água de chuva como *input* para os dois sistemas de recarga artificial implantados, pois a grande concentração de chuvas entre outubro e abril, provoca um elevado excedente hídrico nesse período.

Também são apresentados os resultados dos testes de simulação de eventos extremos de precipitações, que permitiram o dimensionamento de uma caixa de infiltração adequada à área de pesquisa, bem como os resultados de balanços hidrológicos, simulando diferentes condições de ocupação do CABV e comparando essas condições com a de pré-urbanização, avaliando os impactos da urbanização sobre os recursos hídricos subterrâneos e superficiais, bem como a eficiência dos sistemas testados. Os resultados apontam para uma eficiente ferramenta de

Figura 1 - Mapa de localização e articulação da área de pesquisa no Distrito Federal.

gestão dos recursos hídricos no DF e uma solução adequada para os problemas de abastecimento público de água em áreas específicas ocupadas por condomínios residenciais na região.

GEOLOGIA E HIDROGEOLOGIA O CABV onde foram implantados e testados os sistemas de recarga artificial localiza-se no Domo Estrutural de Sobradinho (Chapada da Canastra), a 20 km de Brasília, uma região classificada, geomorfologicamente, como chapada elevada (Martins & Baptista 1998). Nessa área o manto de intemperismo alcança, em média, 30 metros de espessura e os solos possuem condutividades hidráulicas verticais variando de 0,1 a 8,5 m/dia (Souza 2001), sendo estes os maiores valores observados nas coberturas no DF.

Na área pesquisada ocorrem essencialmente rochas atribuídas às unidades litoestratigráficas R_3 (Metarritmito Arenoso) e Q_3 (Quartzito Médio) do Grupo Paranoá, que estão recobertas por uma ampla cobertura de latossolos vermelho, vermelho-amarelo e neossolos quartzarênicos. A Unidade R_3 é formada pela alternância de pacotes de metassiltitos, metargilitos e bancos de quartzitos e a Unidade Q_3 é formada por bancos maciços de quartzito bem selecionado de granulometria fina a média. As coberturas de solo predominantes são homogêneas e com elevado potencial para o desenvolvimento de processos erosivos. Nesses solos ocorrem, aproximadamente aos oito metros de profundidade, delgadas camadas de crostas lateríticas degradadas, cujas condutividades hidráulicas nessa profundidade variam de 0,86 a 0,08 m/dia.

No DF ocorrem dois domínios hidrogeológicos, um com porosidade intergranular e outro com porosidade planar secundária (Campos & Freitas-Silva 1998). Na área de pesquisa ocorrem os mais importantes sistemas aquíferos do DF, o Sistema P_1 (Domínio Poroso) formado pelo conjunto solo – saprolito e constituído por aquíferos intergranulares contínuos e livres de ampla extensão lateral, que recobre o Sistema Paranoá - Subsistema R_3/Q_3 (domínio fissural), constituído de aquíferos fissurais livres ou semiconfinados, com transmissividade variando de 1,3 a 43,2 m²/dia.

De acordo com Campos & Freitas-Silva (1998), Souza (2001) e Campos & Tröger 2003, a observação de fraturas secas no Subsistema R_3/Q_3 , imediatamente abaixo da zona saturada do Sistema P_1 , indica a existência de uma segunda zona não saturada, relativa às fraturas dos aquíferos fissurais. Isso implica na ocorrência de duas superfícies potenciométricas, uma no domínio poroso (manto de alteração) e outra, nas fraturas das rochas subjacentes, no domínio fissural. Esse modelo, denominado Modelo das Duas Superfícies Potenciométricas, não deve ser aplicado a todas as regiões do DF, restringindo-se apenas às regiões de chapadas elevadas, onde ocorre o Subsistema R_3/Q_3 recoberto pelo Sistema P_1 .

As conclusões de Sousa (2001) são muito importantes para a compreensão do processo natural de recarga do Sistema P_1 e Subsistema R_3/Q_3 nas áreas de chapada elevada do DF. Em termos de recarga, duas etapas de infiltração natural devem ser consideradas: uma através dos solos até a zona saturada do domínio poroso e outra, a partir do momento em que o Sistema P_1 se encontra numa condição de máximo armazenamento, quando então, a carga hidráulica é capaz de vencer a barreira formada pelo ar/argilas presentes nas fraturas e iniciar a infiltração em direção a zona saturada dos aquíferos do Subsistema R_3/Q_3 no domínio fissural.

Após a ocupação urbana no CABV e no caso de o abastecimento público de água ser baseado no bombeamento do

subsistema R_3/Q_3 , o risco de sobreexplotação será o maior impacto causado à dinâmica hídrica local. Considerando o Modelo das Duas Superfícies Potenciométricas, a impermeabilização interromperá em curto prazo o processo de recarga natural dos aquíferos no Sistema P_1 , diminuindo a porcentagem do excedente hídrico que alcança a primeira superfície potenciométrica e fazendo com que a carga hidráulica na zona saturada do Sistema P_1 seja insuficiente para vencer a barreira hidráulica na interface com o subsistema R_3/Q_3 . Isso acarretará em uma significativa diminuição do volume de infiltração no domínio fissural. Por outro lado, a exploração concomitante de água subterrânea do subsistema R_3/Q_3 provocará o rebaixamento da segunda superfície potenciométrica, o que levará os aquíferos locais à condição de sobreexplotação, tornando insustentável o abastecimento público de água no CABV (Figura 2).

Os resultados de cálculos de balanço hídrico apresentados nesse trabalho são baseados nas seguintes equações: $dV/dt = (P.A) + Izv - Qb - (ET.A) - (Es + Qi)$ onde: dV/dt – variação do armazenamento no Sistema P_1 ; P – precipitação; A – área; Izv =

Figura 2 – Desenho esquemático do Ciclo hidrológico local em condições de pré-urbanização (A) e após urbanização (B). P - precipitação, ET - evapotranspiração, Ev - evaporação, Es - escoamento superficial, Qbp - fluxo de base do meio poroso, Qbf - fluxo de base do meio fraturado, Izv - infiltração na zona saturada do sistema P_1 , If - infiltração no subsistema R_3/Q_3 , ZIP - zona não saturada do domínio poroso, ZSP - Zona saturada do domínio poroso, ZIF - zona não saturada do domínio fraturado, ZSF - zona saturada do domínio fraturado, Q - vazão total de exploração.

vazão de entrada na zona vadosa; Q_b – fluxo de base; ET – evapotranspiração; Es – escoamento superficial e Qi – interfluxo. Como em equilíbrio dV/dt no Sistema P_1 é zero, $Izv = (P.A) - Es - (ET.A)$ e como $If = Izs - Q_b$; então, $If = (P.A) - (Es + Qi) - (ET.A) - Q_b$. Os dados necessários para a solução do balanço hídrico foram obtidos por monitoramento direto de vazões dos córregos Sarandi, Sobradinho e Corguinho, além daqueles obtidos de estação climatológica situada próxima a área e controlada por estação local.

Baseado no Modelo das Duas Superfícies Potenciométricas foram construídos e testados dois sistemas de recarga artificial na área de pesquisa, cujos objetivos principais são: manter o processo natural de recarga no meio fissural e minimizar os impactos causados pela impermeabilização, quando da urbanização do CABV, tornando sustentável o uso dos recursos hídricos subterrâneos na área que será ocupada.

RECARGA ARTIFICIAL A recarga artificial de aquíferos por bacias de recarga (Recharge Basins), é a forma de recarga artificial mais comumente utilizada e também a mais antiga. No início do processo forma-se uma elevação (cone de ascensão) da água na superfície freática, que com o espalhamento e re-equilíbrio hidráulico, desaparece no final da recarga (Hantush 1967 e Singh 1976). Esse tipo de recarga é viável em solos com alta permeabilidade e grande profundidade e apresenta uma excelente relação custo - benefício. Os exemplos mais bem conhecidos são as bacias de recarga artificial de Long Island, Nova York, EUA, onde as enxurradas das ruas e parques, durante as épocas de chuva, são desviadas para bacias de recarga (Seaburn 1970ab); de Peoria, Illinois, EUA, onde a taxa de infiltração das bacias ao longo do curso do rio varia de 6,1 a 30,5 metros por dia (Smith 1967; Harneson et al. 1968); e de Orange County, California, EUA, onde o aquífero é recarregado com água de rio (Matthews 1991).

Na região metropolitana de Madras, Tamil Nadu, Índia, a forma encontrada pelo estado para garantir o atendimento à demanda de água na região, foi elevar os níveis freáticos dos aquíferos locais, por meio de leis, que acompanhadas de intensas campanhas de conscientização, obrigam as novas áreas residenciais a captar a água da chuva dos seus telhados e conduzir essa água até caixas rasas de infiltração. Os poços de observação na cidade de Madras mostram que o nível freático do principal aquífero da região elevou aproximadamente 6 m em um raio de 2 Km durante o período de 1988 a 1995, indicando o impacto positivo da recarga artificial de aquíferos na região metropolitana (Kittu et al 1999).

Em algumas regiões do Brasil muitas são as formas de pavimentação semipermeáveis e caixas de retenção do excedente hídrico que têm sido utilizadas para controlar o escoamento superficial e resolver os freqüentes problemas de enchentes dos grandes centros urbanos. Algumas destas ações também contribuem para recarga dos aquíferos locais e podem ser consideradas como práticas de recarga artificial de aquíferos, embora este não seja o objetivo principal.

No Aeroporto Internacional de Guarulhos (São Paulo) os efeitos do incremento de urbanização sobre os aquíferos da bacia sedimentar de São Paulo (Formação Resende), principalmente após a construção do aeroporto, que acelerou o processo de ocupação e conseqüente impermeabilização da área ao seu entorno, têm refletido no nível e produção dos poços tubulares profundos que abastecem o aeroporto. De acordo com Vendrame (1998) os poços de abastecimento do aeroporto baixaram a produção de 120 m³/h para 35 m³/h. Conforme se constatou nos estudos realizados pelo Departamento de Água e Energia Elétrica de São Paulo (DAEE) e

Diniz et al (1997) a melhor forma de recuperar o aquífero local seria através da realização de recarga artificial com caixas de infiltração na zona não saturada. Vendrame (1998) propõe o armazenamento da água de escoamento superficial em reservatórios conectados às caixas de recarga, onde seriam realizados alguns tratamentos, como filtragem e cloração, antes da injeção por gravidade nas caixas. Contudo, o autor também chama atenção para o risco de contaminação, uma vez que a qualidade da água de escoamento superficial, que contém derivados de petróleo, aumentaria os custos com tratamento e manutenção dos sistemas de recarga artificial.

A maioria dos estudos realizados no Brasil (Araújo et al 2000, Soares Cruz et al 1998 e Menegasse et al 1999), a respeito do armazenamento e/ou infiltração de água de precipitação e/ou escoamento superficial, permanecem no âmbito dos pequenos reservatórios individuais, que objetivam apenas o consumo da água em tempos de estiagem e a infiltração do excedente hídrico para redução dos volumes escoados, visando apenas à prevenção de enchentes em áreas de risco. Todavia, os métodos de armazenamento não devem permanecer na escala de cada residência, lote, edifício ou casa, principalmente no que tange a regiões abastecidas por água subterrânea. Os projetos de contenção devem visar, como objetivo principal, e não como conseqüência, a recarga artificial dos aquíferos explorados, objetivando o armazenamento de água em subsuperfície e restabelecendo os processos naturais do ciclo hidrológico.

Contudo, a recarga artificial, quando realizada sem critérios, também pode resultar em problemas aos aquíferos, principalmente no que diz respeito à contaminação. Apesar das camadas não saturadas do aquífero funcionarem como filtros naturais (Hordon 1977 e Fetter 1977), pode haver contaminação em função da recarga artificial mal dimensionada. Isso poderá ocorrer, uma vez que, todo filtro tem sua capacidade máxima de filtragem. Quando as águas infiltradas são excessivamente contaminadas, como as industriais e de escoamento superficial, ou o aporte de infiltração indesejada passa a ser maior que a capacidade potencial filtrante do solo, se inicia o processo de contaminação dos recursos hídricos subterrâneos.

A qualidade da água utilizada está entre os mais importantes aspectos de um estudo de recarga artificial, principalmente devido aos riscos de contaminação do aquífero recarregado e da possibilidade de selagem da porosidade pelo particulado. Na área do DF não há indústrias ou outras atividades que poderiam ser responsáveis pela contaminação da atmosfera, portanto a qualidade da água da chuva é muito boa. A condutividade elétrica é aproximadamente 1 $\mu S/cm$ e há pouca matéria particulada, apenas restrita quantidade no início do período chuvoso. Como os sistemas implantados utilizam água de precipitação pluviométrica captada nos telhados das residências sem contato com o solo, ela apresenta qualidade compatível com o uso pretendido. As observações indicam que águas que entraram em contato com a superfície incorporando material argiloso, ou águas acumuladas nas superfícies das ruas não devem ser utilizadas na recarga artificial. Esse tipo de água pode selar a porosidade do solo e causar contaminação por resíduos de óleo lubrificante, borracha de pneus e combustíveis, os quais contém metais pesados. Outro aspecto importante a ser considerado é a utilização de fossas sépticas para destinação dos esgotos em condomínios residenciais no DF, que pode ser considerada uma recarga artificial indesejada.

Sistema indireto de recarga artificial Esse sistema de recarga

artificial foi desenvolvido com o intuito de acelerar o processo natural de recarga dos aquíferos fissurais do subsistema R_3/Q_3 , em áreas de recarga regional no DF. Fundamentado no Modelo das Duas Superfícies Potenciométricas, a eficiência desse sistema implica inicialmente, na indução de um armazenamento máximo de água na zona saturada do Sistema Aquífero P_1 (domínio poroso), a partir de caixas de infiltração no latossolo, sendo considerado uma forma de intensificar o armazenamento hídrico no reservatório poroso, posteriormente induzindo a recarga nos aquíferos fissurais subjacentes.

Essa técnica consiste na captação de água de chuva em telhados residenciais e comerciais de condomínios residenciais, com posterior condução dessa água até caixas de infiltração no latossolo. O sistema instalado na área do CABV é constituído, fisicamente, de telhado, calha de captação, tubulação exposta, tubulação subterrânea, caixa de passagem e caixas de infiltração (Figura 3). Funciona com base na utilização de caixas permeáveis para a infiltração da água de precipitação pluviométrica na zona vadosa do Sistema P_1 , onde a água disponível é captada por meio das calhas instaladas às margens do telhado e conduzida por tubulações de PVC até as caixas permeáveis.

A água conduzida à infiltração é a mesma que naturalmente infiltraria em condições de pré-urbanização, tendo contato apenas, com a telha e a tubulação de condução. Dessa forma, o objetivo é que todo volume de água precipitado nas áreas de telhado infiltre através da zona vadosa do sistema P_1 , até atingir a superfície potenciométrica no domínio poroso e que parte desse volume, conseqüentemente, infiltre para as fraturas não saturadas da zona não saturada nas fraturas do subsistema R_3/Q_3 .

Quatro caixas de recarga foram testadas com intuito de avaliar sua eficiência. Os tubos condutores verticais estão expostos e possuem diâmetro de 88mm. Os tubos condutores horizontais são subterrâneos e possuem diâmetro de 50mm. No conjunto piloto construído para o teste e monitoramento da infiltração foi instalado

Figura 3 - Telhado experimental, calhas de captação e disposição das caixas de infiltração do sistema indireto de recarga artificial.

um hidrômetro para quantificar o volume efetivamente conduzido à infiltração. No tubo condutor horizontal, após o hidrômetro, há uma caixa de passagem, cujo objetivo é aeração, decantação de partículas e divisão do volume d'água para diferentes tipos de caixa de recarga.

As quatro caixas de infiltração construídas como protótipos apresentam forma cilíndrica com 1 metro de diâmetro por 2,5 metros de profundidade, dos quais dois metros são úteis para infiltração. As caixas testadas diferem umas das outras quanto às formas de revestimento e preenchimento, justamente para verificar a eficácia de infiltração em cada uma delas, e são descritas a seguir:

1. Caixa de infiltração não preenchida, do tipo tabuleiro de xadrez (Figura 4a), parede revestida por tijolos intercalados e fundo aberto, com camada de 10 cm de cascalho no fundo para evitar a floculação de argilas durante a queda d'água;
2. Caixa de infiltração preenchida por cascalho (Figura 4b), parede sem revestimento, com 2 metros preenchidos por cascalho de quartzo (porosidade de 44%);
3. Caixa de infiltração preenchida por areia (Figura 4c), parede sem revestimento, com 2 metros preenchidos por areia grossa (porosidade de 35%);
4. Caixa de infiltração não preenchida, com revestimento de manilha perfurada (Figura 4d), parede revestida por manilhas perfuradas nas laterais e fundo aberto, com camada de 10 cm de cascalho para evitar a floculação de argilas durante a queda d'água ao fundo;

Essa técnica de recarga artificial pode acarretar em risco geotécnico relacionado à presença de uma crosta laterítica que funcionaria como uma barreira física ao fluxo vertical de recarga. A redução abrupta da condutividade hidráulica poderia causar o acúmulo de água suspensa, o qual, em áreas onde o terreno apresenta declividade mais acentuada, sob a ação do gradiente hidráulico, provocaria fluxos subhorizontais formando condutos subterrâneos, os quais poderiam induzir o colapso do solo. Processo semelhante a esse ocorre dentro da área do Parque Nacional de Brasília, no local conhecido como Três Buracos (Freitas-Silva & Campos 1995), onde o fluxo subterrâneo concentrado ao longo de zonas de fraturas resulta na remoção de material fino e conseqüente desenvolvimento de condições para o recalque da porção superior do solo.

A crosta laterítica não apresenta continuidade lateral, como observado durante a perfuração de poços tubulares profundos e poços rasos. Essa descontinuidade lateral garantiria um predomínio dos fluxos verticais sobre os horizontais, principalmente nas áreas mais elevadas onde a declividade do terreno é muito baixa. Assim, apesar de não poder ser descartado, o risco geotécnico é considerado muito baixo.

Sistema direto de recarga artificial Essa técnica de recarga artificial consiste na utilização de um poço tubular profundo de injeção com completo isolamento do domínio poroso, e injeção direta do excedente hídrico nas fraturas do subsistema R_3/Q_3 . Apesar de inicialmente ter sido proposto e construído como uma técnica para recarga direta no meio fraturado, esse sistema passou a ser uma opção alternativa de recarga para áreas, onde os riscos geotécnicos são maiores, como na área sul do condomínio.

O protótipo desse sistema de recarga artificial foi construído ao lado de um poço tubular profundo já existente. Constitui-se de um conjunto formado por telhado experimental, calha de captação instalada nas extremidades do telhado, tubulação de condução vertical (88mm) e horizontal subterrânea (60mm), caixa de filtragem

Figura 4 - Caixas de recarga artificial construídas na área do CABV, sistema Indireto. a) Caixa tipo tabuleiro de xadrez. b) Caixa de infiltração preenchida por cascalho c) Caixa de infiltração tipo manilha furada. d) Caixa de infiltração preenchida por areia.

e aeração e poço tubular profundo de injeção do excedente hídrico. Entre os condutores verticais e horizontais foi instalado o hidrômetro. Os condutores horizontais conectam o conjunto de captação da água de precipitação pluviométrica com a caixa de filtração e aeração, a qual circunda a boca do poço constituída de um filtro de oito polegadas por onde a água entra no poço. Tem-se ainda uma caixa de segurança em conexão com o poço de injeção, que serve para receber o excesso de água, em caso de transbordamento, funcionando como uma caixa de infiltração do sistema indireto.

RESULTADOS E CONCLUSÕES Foram realizados balanços hídricos considerando diferentes condições de ocupação, para a área diretamente afetada pelo CABV. Para tanto, foram monitoradas as precipitações, temperaturas e descargas nos córregos durante o ano hidrológico de 2001. Também foram feitos ensaios hidrogeológicos e testes de capacidade dos sistemas experimentais, simulando eventos de precipitação com intensidades variando de 65 mm/h a 90 mm/h, que implicaram em elevadas vazões de teste. Esses ensaios foram úteis na determinação dos parâmetros hidrogeológicos locais, na avaliação da capacidade máxima dos sistemas de recarga artificial testados e na determinação da relação entre a área de interceptação do telhado e as dimensões da caixa de recarga, permitindo elaborar um projeto padrão de caixa de recarga para o CABV. Além disso, também foram úteis para mostrar que a eficiência dos sistemas testados depende do correto dimensionamento do conjunto telhado – calha – tubulação, sendo

inversamente proporcional às perdas por defeitos construtivos (dc).

Para o sistema indireto de recarga artificial, com relação ao tipo de caixa de infiltração mais adequado à aplicação dessa técnica, a caixa preenchida por cascalho respondeu melhor às intensas injeções de água. Caixas preenchidas com cascalho ou areia e sem revestimento possuem toda a área cilíndrica da parede e o fundo da caixa, como superfície de infiltração. Nessas caixas, a infiltração radial é bem mais rápida do que em caixas com revestimento e sem preenchimento. Todavia, o tipo do material utilizado no preenchimento deve ser inerte, possuir bom arredondamento, boa esfericidade e porosidade efetiva maior que 40%, o que garante o melhor escape do ar acumulado na porosidade do material. A caixa de areia, cuja porosidade é de 35%, apresentou transbordamento de água frente às intensas chuvas simuladas. A infiltração é lenta nessa caixa, o que provoca imediatamente a formação de uma camada de água acima da areia, impedindo a saída do ar e provocando o transbordamento. As dimensões utilizadas também se demonstraram adequadas para a área de contribuição do telhado experimental, suportando bem os intensos eventos pluviométricos simulados.

O provável risco geotécnico relacionado à implantação desse sistema, causado pelo caráter colapsivo dos latossolos e pela concentração de fluxo subhorizontal na zona vadosa, devido a prováveis barreiras hidráulicas de oposição ao fluxo vertical, pode ser minimizado por meio da perfuração de um furo de 100 mm de diâmetro no centro da caixa de infiltração, a partir dos 2,5 m já

perfurados, o qual deverá ultrapassar prováveis barreiras hidráulicas e pode ser feito com um trado minimizando os custos. Esse furo manterá a predominância do fluxo vertical impedindo a concentração de água suspensa e a formação de interfluxo, reduzindo os riscos de transporte e erosão subterrânea, que poderiam afetar as estruturas de edificações.

A relação custo/benefício também deve ser levada em consideração e no caso do sistema indireto, as caixas de cascalho são bem mais acessíveis que as demais, além de apresentar melhor resposta à infiltração e serem de fácil construção. Dessa forma, a caixa de recarga adequada à aplicação sistemática desse sistema (Fig. 5) deve ter 1 metro de diâmetro, 3 metros de profundidade, com 2,5 m úteis para infiltração, ou seja, a relação deve ser de 2,5 m para cada 200 m² de área de contribuição do telhado, mantendo sempre uma distância de pelo menos 10 m entre cada caixa.

Três poços de observação (PO₁, PO₂ e PO₃) foram instalados de forma triangular em relação às caixas de recarga artificial. O PO₁ (10 metros de profundidade) se encontra 3 m a sul das caixas, o PO₂ (10 m de profundidade), 30 m a norte e o PO₃ (15 metros de profundidade), 20 m a nordeste. O monitoramento do nível estático nos três poços de observação, entre maio de 2001 e maio de 2002, demonstrou um resultado bem otimista quanto à infiltração efetiva do excedente hídrico na zona saturada do sistema P₁ e, conseqüentemente, para as fraturas do subsistema R₃/Q₃.

O terreno possui uma leve declividade para sul, enquanto o

nível estático manteve-se com declividade nitidamente oposta, para norte (Fig. 6). Pela declividade do terreno e pela elevada homogeneidade lateral dos latossolos, que constituem o sistema P₁, era de se esperar que o nível estático também acompanhasse a declividade do terreno, para sul, ou pelo menos mantivesse a mesma altura nos três poços de observação. Entretanto, o PO₁, desde o início da estação chuvosa, apresentou um nível estático médio de cerca de 70 cm acima dos outros dois poços, que mantiveram sempre os níveis muito próximos, variando no máximo 10 cm entre si (Figura 7). Isso indica a formação de uma elevação na superfície potenciométrica imediatamente abaixo das caixas de recarga artificial do sistema indireto, representando a formação de um cone de ascensão e confirmando a injeção de água na zona saturada do sistema P₁.

A reduzida dimensão do cone de ascensão pode indicar um predomínio do fluxo vertical em detrimento do fluxo lateral na zona saturada do sistema P₁, havendo efetiva recarga do sentido vertical, o que pode favorecer também a recarga no domínio fissural subjacente.

Por ser o PO mais profundo, apenas o PO₃ teve um registro contínuo de oscilação do nível estático. Nos demais, o nível estático mais baixo ultrapassou a profundidade dos poços, interrompendo o monitoramento. Observa-se na figura 6, que, mesmo após o início das chuvas, o nível estático continua descendo até o mês de novembro e somente então, volta a subir. No caso do PO₁ o início

Figura 5 – Projeto padrão da caixa de recarga artificial do sistema indireto.

da subida do nível acontece praticamente 15 dias antes dos demais, o que é um resultado da aceleração do processo natural de recarga, devido ao funcionamento das caixas experimentais de recarga artificial testadas durante o ano hidrológico de 2001 / 2002.

Conforme o balanço hídrico da área diretamente afetada pela ocupação do CABV, em condições de pré-urbanização, a recarga natural durante o ano de 2001, para o sistema P_1 e subsistema R_3/Q_3 respectivamente, foi igual a 3.596.124 m³ e 2.284.880 m³, ou seja, 26% e 17% do total precipitado na área. Outra observação importante nos cálculos do balanço hídrico refere-se aos valores mínimos de recarga no sistema P_1 para que seja possível a recarga no subsistema R_3/Q_3 . Para valores de recarga natural no sistema P_1 inferiores a 15% do volume precipitado, as perdas por fluxo de base (Q_b) nas nascentes dos córregos Sarandi e Sobradinho tornam-se maiores que o volume recarregado fazendo com que não sobre água disponível à recarga no subsistema R_3/Q_3 .

Considerando que a ocupação do CABV implicará na impermeabilização mínima de 57% da área total prevista e que apenas 20% equivalem a áreas impermeabilizadas por telhados, o balanço hidrológico mostra que, se a ocupação ocorrer sem a utilização do sistema indireto de recarga artificial, a recarga no sistema P_1 teria sido no mínimo igual a 1.231.776,5 m³ e no máximo 2.318.161 m³, ou seja, respectivamente 9% e 17% do total precipitado ao longo do ano de 2001. Significa dizer, que no subsistema R_3/Q_3 , ou não teria ocorrido recarga, ou a recarga teria sido no máximo igual a 1.006.917 m³, ou seja, não teria ultrapassado 7,5% do volume hídrico disponível no ano.

Para a área de telhado no sistema experimental instalado no CABV, cujas perdas por dc , calculadas durante os ensaios de injeção foram iguais a 64% do volume total injetado, a recarga artificial na zona saturada do sistema P_1 foi igual a 22% do volume total precipitado durante o ano hidrológico monitorado, contra 26% de recarga natural em condições de pré-urbanização. Essa situação não é a ideal, devido ao elevado percentual de dc , mesmo assim, a recarga artificial se aproxima muito das condições naturais de recarga. Com conjuntos de telhado-calha-tubulação dimensionados para percentuais máximos de dc iguais a 50%, a recarga artificial seria igual à natural, ou seja, seria o suficiente para haver uma manutenção das condições naturais de recarga, como se não tivesse ocorrido ocupação urbana.

Figura 6 - Bloco diagrama esquemático com a simulação do cone de ascensão sob a área submetida à recarga artificial do aquífero.

Figura 7 - Gráfico de oscilação do nível estático nos poços de observação. t1 – início da seca, t2 – início das chuvas.

A comparação entre balanços hídricos na área diretamente afetada mostra uma alta eficiência para o sistema indireto de recarga artificial proposto neste trabalho. Com a utilização desse sistema, caso os percentuais de dc não ultrapassem 50%, a recarga no sistema P_1 seria no mínimo igual a 2.711.777,6 m³ e no máximo 3.828.437 m³, ou seja, 20% e 29% do total precipitado. Isso equivale dizer que para o sistema P_1 a recarga seria de 16% a 65% e para o subsistema R_3/Q_3 , de 39% a 150% maior que em condições de ocupação sem a utilização dos sistemas indiretos de recarga artificial. Comparando os valores na condição de ocupação com a utilização do sistema indireto de recarga artificial e na condição de pré-urbanização, a recarga no subsistema R_3/Q_3 seria 10% maior que em condições naturais. Esse resultado demonstra a eficiência da utilização do sistema indireto de recarga artificial como ferramenta de gestão dos recursos hídricos numa área de recarga regional urbanizada do DF.

Deve-se levar em conta, que o abastecimento público de água no CABV e de vários outros condomínios é baseado na exploração de água dos aquíferos fissurais do subsistema R_3/Q_3 . Tomando-se como exemplo o ano hidrológico de 2001 e utilizando-se o consumo médio de água por habitante no DF (220 litros por pessoa, por dia), se a ocupação urbana no CABV tivesse ocorrido sem a utilização dos sistemas indiretos de recarga, o consumo de água teria sido de 2.441.120 m³, ao passo que, o volume disponível para a recarga do subsistema R_3/Q_3 teria sido de apenas 1.006.917 m³. Essa situação causaria um rebaixamento progressivo das superfícies potenciométricas no domínio poroso e fraturado, causando, respectivamente, o secamento das nascentes dos tributários das bacias dos córregos Sarandi e Sobradinho e a falta de água para o abastecimento público. Ou seja, não haveria recarga nos aquíferos explorados, o que os levaria à condição de sobreexploração. Nesse contexto, a utilização do sistema indireto de recarga artificial, não só manterá as condições naturais de recarga na área diretamente afetada pela ocupação, garantindo a sustentabilidade do sistema e a disponibilidade de água para consumo humano, como também promoverá um incremento anual nas reservas hidrogeológicas do sistema P_1 e subsistema R_3/Q_3 , considerando que as condições climatológicas não sejam muito diferentes daquelas observadas em 2001.

A maior vantagem do sistema indireto de recarga artificial é que as perdas totais por evapotranspiração são significativamente reduzidas, e passam a ser exclusivamente perdas por evaporação na área impermeabilizada por telhado. Após entrar na tubulação

de condução à caixa de infiltração, não há perdas de água por evaporação. As perdas de água por escoamento superficial em condições naturais são transferidas para as perdas por defeitos construtivos no conjunto telhado – calha – tubulação e as perdas por interfluxo, que já são mínimas em áreas de chapada elevada. Estas perdas também são minimizadas com a utilização das caixas de recarga propostas, uma vez que, injetando-se a água a mais de 2 metros de profundidade, há garantia de predomínio do fluxo vertical. Outra vantagem das caixas de infiltração sobre as condições naturais é que naturalmente, em condições de pré-urbanização, quando ocorre um evento pluviométrico de intensidade maior que a capacidade de infiltração do solo, rapidamente as camadas superficiais se encharcam e, se a precipitação mantém-se constante, a infiltração ocorre nas mesmas taxas da curva da capacidade de infiltração do solo, a qual vai diminuindo exponencialmente no tempo e tendendo a um valor mínimo. Nessas condições, a maior parcela do volume precipitado acaba escoando pela superfície. No caso do uso das caixas de recarga artificial do sistema indireto, quando isso acontecer, o volume excedente não escoará pela superfície, ele é injetado a uma profundidade mínima de metros, maximizando a infiltração.

Existem algumas condições geomorfológicas, geológicas e pedológicas bem definidas, que proporcionam um quadro ideal à aplicação do sistema indireto de recarga artificial de aquíferos fraturados. Fora dessas condições, não é aconselhável a utilização desse sistema. Trata-se de áreas com declividade máxima de 8%, onde ocorra, necessariamente, um manto de intemperismo com condutividade hidráulica variando de $2,3 \times 10^{-5}$ a 3×10^{-4} m/s (2 a 25 m/dia) (Souza 2001, Joko 2002, Cadamuro 2002) e espessura mínima de 15m, o qual deve recobrir um meio fissural com condutividades hidráulicas da ordem de $5,8 \times 10^{-7}$ a $1,16 \times 10^{-5}$ m/s (5×10^{-2} a 1 m/dia) (Campos & Freitas-silva 1998, Souza 2001, Cadamuro 2002). No DF compartimentos geomorfológicos do tipo chapada elevada, onde ocorre associação de aquíferos, do meio poroso e fissural, do tipo $P_1 - R_3/Q_3$ são os mais adequados e ideais à utilização desse sistema.

Atendidos os pré-requisitos básicos para sua utilização, o sistema indireto de recarga artificial é a melhor maneira de manter o equilíbrio dinâmico dos aquíferos fraturados explorados para abastecimento público de água em áreas urbanizadas por condomínios residenciais no DF. Essa técnica garante a manutenção da recarga no domínio fissural, interrompida devido à impermeabilização generalizada dos terrenos ocupados.

Para o sistema direto de recarga artificial, precipitações da ordem de 120 mm/h foram simuladas sobre o telhado experimental do sistema direto de recarga artificial. Levando em consideração que durante a pesquisa, o evento pluviométrico de maior intensidade foi da ordem de 90mm/dia, a precipitação pluviométrica simulada representa condições extremas de chuva. Para o caso específico do sistema experimental implantado e testado na área do CABV, onde foi utilizado um poço já existente como poço de injeção, a capacidade máxima de infiltração, para um evento como o registrado (90mm/dia), limita-se apenas a uma área de 400m² por poço de injeção.

A maior utilidade do sistema direto de recarga consiste na sua aplicação em áreas de maior risco geotécnico. Em áreas mais críticas, do ponto de vista do risco geotécnico, como é o caso da porção sul do CABV, esse sistema poderia ser implantado diminuindo a intensidade de caixas de infiltração.

Cuidados devem ser tomados com a qualidade da água a ser injetada, principalmente no caso do sistema direto de recarga artificial, pois a água não passa pela camada de filtro natural representada pelo solo, como ocorre no caso do sistema indireto de recarga artificial, ou em condições naturais. Nesse caso, deve-se elaborar um programa de monitoramento constante das condições físico-químicas e bacteriológicas da água de precipitação e da água subterrânea no subsistema R_3/Q_3 .

O sistema direto de recarga artificial nos aquíferos fraturados do subsistema R_3/Q_3 , através de poços de injeção, não apresenta a mesma eficiência das caixas de recarga do sistema indireto, apresentando duas restrições importantes quanto ao seu uso intensivo. A primeira diz respeito à eficiência do sistema e à razão custo – benefício e a outra diz respeito aos riscos de contaminação no meio fissural. Assim, conclui-se que o sistema direto apresenta viabilidade limitada.

A utilização dos sistemas de recarga artificial propostos, ao longo do tempo, deve incluir a implantação de um plano de avaliação para implementar as seguintes ações:

- Monitoramento mensal das vazões nas fontes das bacias hidrográficas diretamente afetadas pela ocupação de condomínios residenciais em áreas de recarga natural de aquíferos, incluindo a inspeção das fontes secas, que podem ser reabilitadas em longo prazo;

- Monitoramento mensal das oscilações dos níveis estáticos médios das duas superfícies potenciométricas (Sistema P_1 e Subsistema R_3/Q_3);

- Implantação de programa periódico de manutenção das caixas de recarga;

- Implantação, quando possível, de sistemas múltiplos de abastecimento de água, utilizando água superficial durante o verão chuvoso e água subterrânea durante o inverno seco;

- Ampla programação de educação ambiental junto aos moradores de condomínios e comunidades vizinhas, para redução do consumo de água e para dar suporte à utilização dos sistemas de recarga artificial na área, garantindo o interesse de manutenção individual de cada morador;

- Manutenção de sistema periódico de controle da qualidade físico-química e bacteriológica da água de precipitação pluviométrica, da água nas fontes dos tributários das bacias hidrográficas diretamente afetadas, além das águas subterrâneas;

- Instalação de estações meteorológicas em pontos estratégicos das áreas urbanizadas, munidas de pluviômetro, termômetro e evaporímetro para dar suporte à elaboração de futuros balanços hídricos, que possam caracterizar melhor as condições de ocupação e compará-las às condições de pré-urbanização.

Agradecimentos

Aos revisores da RBG pelas sugestões ao manuscrito.

Referências

Araújo P.R., Tucci C.E.M., Goldenfum J.A. 2000. Avaliação da eficiência dos pavimentos permeáveis na redução de escoamento superficial. *Rev. Brasil. Recursos Hídricos*, 5 (3):21–29

Cadamuro A. L. M. 2002. *Proposta, Avaliação e Aplicabilidade de Técnicas de Recarga Artificial em Aquíferos Fraturados para Condomínios Residenciais do Distrito Federal*. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília,

- Dissertação de Mestrado, 130p.
- Campos J. E. G. & Freitas-Silva F. H. 1998. Hidrogeologia do Distrito Federal. In: *Inventário Hidrogeológico e dos Recursos Hídricos Superficiais do Distrito Federal*, Brasília, IEMA / SEMATEC/UnB, p. 1-84, (Vol. IV Relatório Técnico).
- Diniz H.N., Pereira P.R.B., Pereira S.Y., Duarte U. 1997. The impact of falling levels in the sedimentary aquifer supplying São Paulo International Airport, Brazil. In: *Groundwater in the Urban Environment - Problems, Processes and Management*, V. 1, A. A. Balkema Publishers, Rotterdam, Holanda, p. 303-307.
- Fetter C.W. 1977. Attenuation of wastewater elutriated through glacial outwash. *Groundwater*, **15**:365-371.
- Fetter C.W. 1994. *Applied Hydrogeology*. 3 ed. New York, Toronto, 691 p.
- Freitas-Silva F.H. & Campos J.E.G. 1995. Geologia do Parque Nacional de Brasília - DF. *Boletim de Geociências do Centro-Oeste*, **18**:32-43.
- Hantush M.S. 1967. Growth and decay of ground-water mounds in response to uniform percolation. *Water Resources Research*, **3**: 227 - 234.
- Harmeson R.H., Thomas R.L., Evans R.L. 1968. Coarse media filtration for artificial recharge. *Journal American Water Works Association*, **60**: 1396 - 1403.
- Hordon R.M. 1977. Water supply as a limiting factor in developing communities: Endogenous vs. exogenous sources. *Water Resources Bulletin*, **13**:933 -39.
- Joko C.T. 2002. *Hidrogeologia da cidade de São Sebastião - DF. Implicações para a Gestão do Sistema de Abastecimento de Água*. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, Dissertação de mestrado, 158p.
- Kittu N., Varadoraj N., Chakkarapani R. 1999. Urban recharge and its influence on groundwater quality in Sana'a, Yemen. *Groundwater in the Urban Environment: Selected City Profiles*, **21**:39-50
- Lousada E.O. 1999. *Estudos geológicos, e geofísicos aplicados à locação de poços tubulares profundos em aquíferos fraturados na região do Distrito Federal*. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, Dissertação de Mestrado, 110p.
- Martins E.S. & Baptista G.M.M. 1998. Compartimentação Geomorfológica e Sistemas Morfodinâmicos do Distrito Federal. In: *Inventário Hidrogeológico e dos Recursos Hídricos Superficiais do Distrito Federal*, Brasília, IEMA / SEMATEC/UnB, p. 89-138, (Vol. I Relatório Técnico).
- Matthews C.A. 1991. Using ground water basins as storage facilities in southern California. *Water Resources Bulletin* **27** (5):841-847.
- Menegasse L.N., Duarte U., Pereira P.R.B. 1999. Urban recharge and its influence on groundwater quality in Sana'a, Yemen. *Groundwater in the Urban Environment: Selected City Profiles*, **21**:195-199.
- Seaburn G. E. 1970a. Preliminary results of hydrologic studies at two recharge basins on Long Island, New York, U.S.G.S. *Professional Paper*, **627-C**:1-17.
- Singh R. 1976. Prediction of mound geometry under recharge basins. *Water Resources Research*, **12**:775-780.
- Smith H.F. 1967. Artificial recharge and its potential in Illinois. *International Assoc. Sci. Hydrology Publ.*, **72**:136-42.
- Soares Cruz M.A., Tucci C.E.M., Silveira A.L.L. 1998. Controle do Escoamento com Detenção em Lotes Urbanos. *Rev. Brasil. Recursos Hídricos*, **3**(4):19-31.
- Souza M.T. 2001. *Fundamentos para Gestão dos Recursos Hídricos do Distrito Federal*. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília. Dissertação de Mestrado, 94p.
- Theis C.V. 1938. The significance and nature of the cone of depression in ground-water bodies. *Econ. Geol.*, **38**:889-902.
- Vendrame I.F. 1998. The use of soakways and its implications. In: *International Workshop on non Structural Flood Control in Urban Areas*, p.189-196.

Manuscrito A 1489

Recebido em 5 de março de 2004

Revisão dos autores em 15 de dezembro de 2004

Revisão aceita em 10 de janeiro de 2005