

# AVALIAÇÃO DA RECARGA SUBTERRÂNEA DE BACIAS URBANAS NO MUNICÍPIO DE SÃO CARLOS, SP.

Thiago Augusto Maziero<sup>1</sup>; Edson Wendland<sup>2</sup>

**Resumo.** O presente trabalho visa contribuir para um melhor entendimento dos aspectos quantitativos e, por conseguinte, para a caracterização da água subterrânea em centros urbanos. De forma resumida são revistos os mecanismos gerais e métodos de quantificação de recarga de aquíferos. O método WTF (*Water Table Fluctuation*) é aplicado com base em dados obtidos na rede de monitoramento permanente de duas sub-bacias urbanas localizadas na cidade de São Carlos-SP. Para o período de fevereiro de 2004 a fevereiro de 2005, a recarga total foi estimada em 16,40% da precipitação registrada.

**Palavras-chave:** recarga, área urbana, monitoramento.

**Abstract.** Aim of this work was to contribute to a better understanding of the quantitative aspects and characterization of groundwater in urban areas. The general aquifer recharge mechanisms and the methods for recharge estimation are reviewed. The WTF (Water Table Fluctuation) method has been applied with data obtained in the permanent monitoring network installed in São Carlos City. For the period between February 2004 and February 2005, the total recharge rate was estimated to 16.40% of the observed precipitation.

**Keywords:** recharge, urban area, monitoring.

---

<sup>1</sup> Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos; Departamento de Hidráulica e Saneamento; SHS-EESC-USP, Caixa Postal 359; 13560-970; São Carlos; SP; Brasil; (16) 3376-3007; (16) 3373-9550; [tam@sc.usp.br](mailto:tam@sc.usp.br)

<sup>2</sup> Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos; Departamento de Hidráulica e Saneamento; SHS-EESC-USP, Caixa Postal 359; 13560-970; São Carlos; SP; Brasil; (16) 3373-9541; (16) 3373-9550; [ew@sc.usp.br](mailto:ew@sc.usp.br)

## 1. INTRODUÇÃO

Os estudos para a estimativa do volume de recursos hídricos subterrâneos são fundamentais para o planejamento e gestão integrada de recursos hídricos regionais. A quantificação dos recursos anualmente renováveis em áreas urbanas tem destaque especial frente à crescente urbanização e conseqüente impermeabilização do solo, ao aumento de enchentes nos grandes centros urbanos, ao crescente aumento de exploração da água subterrânea e ao problema decorrente da poluição de aquíferos.

A avaliação da recarga subterrânea é um dos desafios fundamentais para o desenvolvimento sustentável (quantitativamente, a exploração não deve exceder a taxa de recarga) de aquíferos. Em centros urbanos, a estimativa de recarga é agravada pelo incremento de novas fontes e trajetórias de recarga, como os vazamentos das redes de água e esgoto. Em conseqüência, a quantificação da recarga subterrânea é uma tarefa árdua e de precisão duvidosa. No entanto, um sistema de monitoramento integrado (monitoramento dos recursos superficiais e subterrâneos e monitoramento hidrológico) tende a reduzir as incertezas envolvidas.

No intuito de disseminar a propagação dos conhecimentos sobre a água subterrânea o presente estudo busca contribuir para a caracterização dos aquíferos livres ou não-confinados localizados em área urbana, através do desenvolvimento do conhecimento de avaliação da recarga subterrânea. A escolha de escala, ou seja, da priorização do enfoque nos aquíferos livres justifica-se no fato de que os processos de recarga são melhores evidenciados. Assim, apresentamos neste trabalho uma avaliação quantitativa da recarga ocorrida no período de fevereiro de 2004 a janeiro de 2005 em 2 (duas) sub-bacias urbanas localizadas no município de São Carlos, SP. A recarga foi estimada a partir do Método de Flutuação da Superfície Piezométrica (*WTF – Water Table Fluctuation*). Esse método e as variáveis envolvidas foram detalhadas e discutidas nesse trabalho.

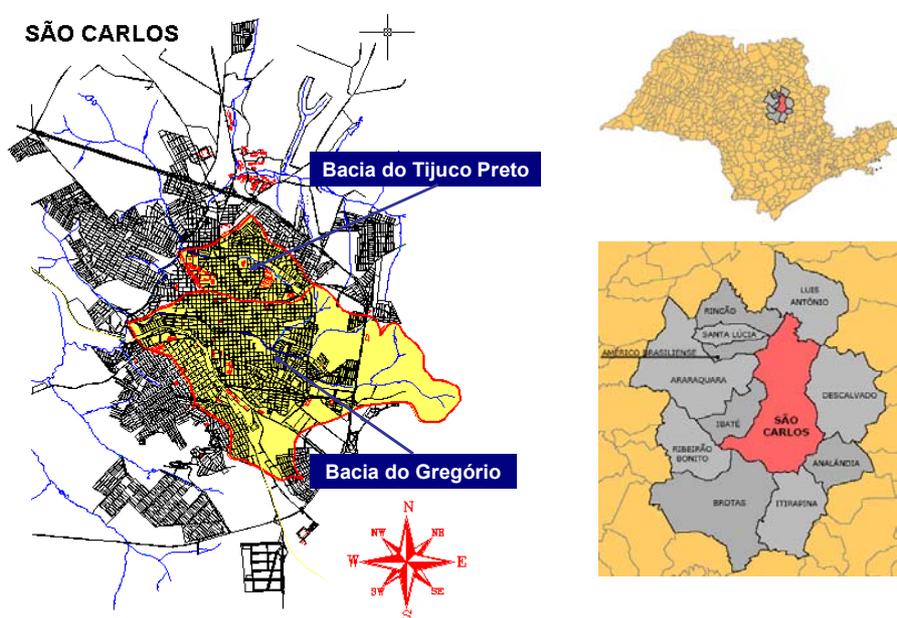
De modo a caracterizar o principal parâmetro envolvido na estimativa da recarga através do Método WTF, foi feito a avaliação do rendimento específico ou coeficiente de armazenamento (para o caso de aquífero freático).

## 2. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo é o ambiente urbano das sub-bacias contíguas do Córrego do Gregório e do Córrego do Tijuco Preto (Figura 1), com áreas de drenagem de, aproximadamente, 18,9 km<sup>2</sup> e 3,9 km<sup>2</sup>, respectivamente, na zona central do município de São Carlos, Estado de São Paulo. A principal razão da utilização destas sub-bacias hidrográficas é o fato de que ambas possuem uma rede permanente de monitoramento de águas subterrâneas, composta de 19 piezômetros. As sub-bacias hidrográficas apresentam intensa urbanização (cerca de 70%) e constantes problemas de

enchentes. Outros fatores como o elevado índice de impermeabilização contribuindo para o aumento do escoamento superficial e reduzindo o potencial de recarga do aquífero freático; o aumento do potencial de poluição dos aquíferos induzido por atividades humanas e o efeito da canalização de córregos, impedindo assim a possível conexão entre os recursos superficiais e subterrâneos, foram motivos que contribuíram para o estudo nessa área.

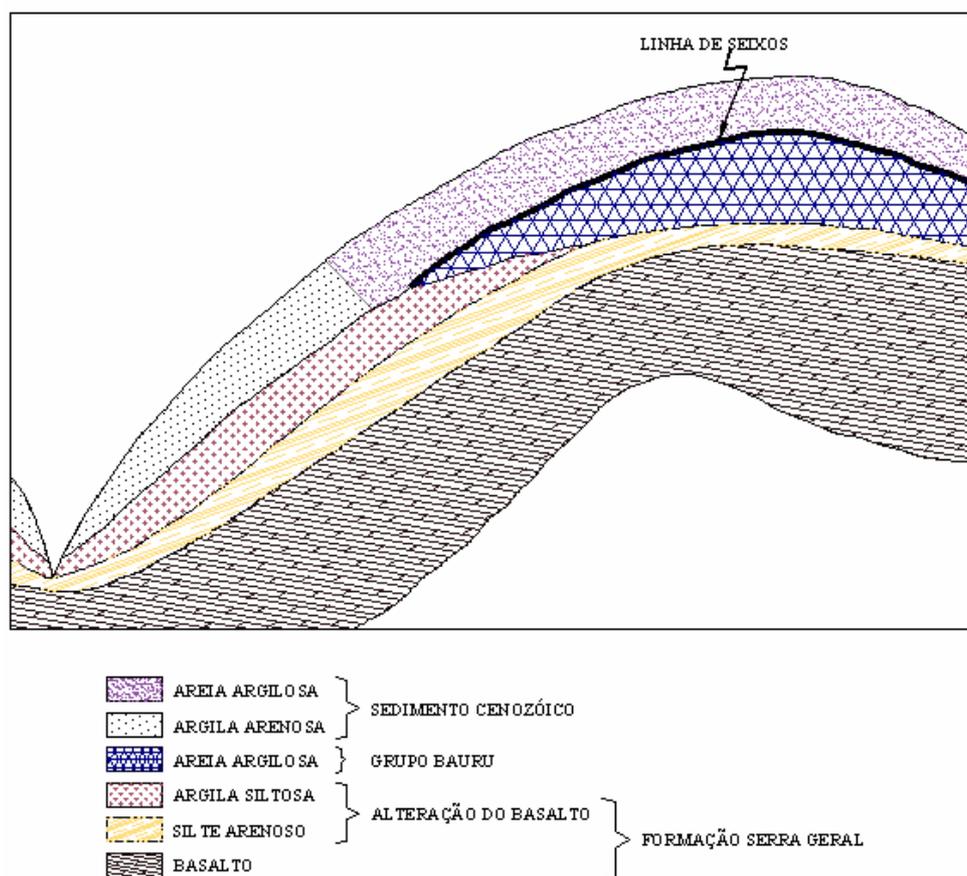
A área é limitada pelas coordenadas UTM 7.558 e UTM 7.565 km Norte, e 199 km e 206 km Leste (*Datum*: Córrego Alegre, MG). As bacias possuem cotas topográficas que variam entre 805 m e 905 m, na Bacia do Tijuco Preto, e 785 m e 935 m, na Bacia do Gregório. A classificação do clima do Município de São Carlos, pela sistemática Köppen, está entre o tipo Cwa e Aw, descrito como transição do clima tropical quente com inverno seco para tropical de verão seco e inverno úmido [1].



**Figura 1 – Sub-bacias do Gregório e do Tijuco Preto na área urbana de São Carlos, SP.  
Fonte principal: Prefeitura Municipal de São Carlos, Mapa Topográfico - Escala 1:10.000**

No sistema hidrográfico, as sub-bacias do Gregório e Tijuco Preto são drenadas pelos dois córregos principais de mesmo nome, com extensão de 8,4 km e 2,9 km, respectivamente. As sub-bacias pertencem à Bacia Hidrográfica do Rio Monjolinho, a qual está inserida na Bacia do Rio Jacaré-Guaçu, inserida na Bacia Hidrográfica do Rio Tietê, inserida na Bacia Hidrográfica do Paraná, que por sua vez, está inserida na Bacia Hidrográfica do Rio da Prata.

No contexto geológico, na zona urbana central de São Carlos predomina o Sedimento Cenozóico Aluvionar, Arenoso, Argiloso, a Formação Serra Geral e o Grupo Bauru (Figura 2). Os leitos do Córrego do Gregório e do Tijuco Preto estão sobre os materiais da Formação Serra Geral e do Sedimento Cenozóico Argiloso, com uma pequena mancha do Sedimento Cenozóico Aluvionar no Córrego do Gregório, próximo ao Mercado Municipal [2].



**Figura 2 – Formações e litologias da malha urbana de São Carlos – sem escala (Adaptado de [2])**

## 2.1. Poços de Monitoramento do Lençol Freático

Os dados utilizados neste trabalho são provenientes de piezômetros da rede permanente de monitoramento de água subterrânea das sub-bacias do Córrego do Gregório e do Córrego do Tijuco Preto. Os piezômetros estão dispostos ao longo das margens dos córregos e perpendiculares a estas, em distâncias que variam de 50 m a 200 m. As profundidades dos piezômetros variam de 4,31 m a 13,32 m.

A distribuição espacial dos poços considera fatores como a existência de áreas livres da impermeabilização, facilidade de acesso e priorização das áreas públicas, além da necessidade de amostrar toda sua extensão.

Os piezômetros são de tubo de *PVC* branco de 4" de diâmetro, revestidos na porção inferior (altura de 1,5 m) com geotêxtil que atua como filtro. O pré-filtro (altura de 1,5 m) utilizado foi areia grossa. O restante do furo foi preenchido com o próprio material escavado. Os tubos de *PVC*, possuem tampas (*caps*) em ambas as extremidades, evitando a entrada de material sólido. Na extremidade superior do tubo de *PVC*, ou seja, na superfície do terreno, existe um bloco de concreto com a finalidade de proteção.

### **3. RECARGA**

#### **3.1. Fundamentação Teórica Introdutória**

A recarga de aquíferos pode ocorrer naturalmente pela precipitação, infiltração de rios, canais e lagos, fluxos inter-aquíferos e via fenômenos induzidos por atividades humanas, como a irrigação e a urbanização [3]. A precipitação é a principal fonte de recarga para aquíferos subterrâneos [4]. Uma vez atingida a superfície, a precipitação proporciona a água necessária para umedecimento do solo e para escoamento superficial, assim como para percolação profunda ao nível freático.

A quantificação da recarga é fortemente influenciada pelas condições climáticas; regiões de clima úmido são normalmente caracterizadas por uma superfície freática rasa, rios efluentes e recarga difusa. As taxas de recarga nestas regiões são frequentemente limitadas pela capacidade do aquífero transmitir e armazenar água, processos que são fortemente influenciados pela geologia sub-superficial. Por outro lado, regiões de clima seco apresentam, normalmente, uma superfície freática profunda, rios influentes e recarga concentrada. As taxas de recarga são limitadas em grande parte pela água disponível na superfície do terreno, que é controlada por fatores climáticos, como a precipitação e evapotranspiração e pelas características geomorfológicas superficiais (topografia, solo e cobertura vegetal) [5].

Existe uma diversidade de métodos para estimativa da recarga. Estes métodos produzem estimativas ao longo de várias escalas de tempo e espaço e preenchem uma gama de complexidades e adversidades [6].

Uma preocupação à aplicação dos métodos para estimativa da recarga é a dificuldade em avaliar a incerteza associada com qualquer estimativa [6]. Diversos autores ([3]; [7]; [5]; [6]) propuseram a aplicação simultânea de diversos métodos de estimativa de recarga, objetivando minimizar as incertezas e obter a consistência nos resultados, que, no entanto, não deve ser entendida como um indicativo de precisão.

#### **3.2. Recarga Subterrânea**

A recarga subterrânea pode ser definida como a infiltração descendente de água através do solo e/ou do fluxo sub-superficial lateral de unidades hidrogeológicas adjacentes [8].

De um modo geral, podem ser distinguidos dois tipos de recarga: recarga direta e recarga indireta. A recarga direta tem origem na precipitação e a recarga indireta pode ser dividida em duas categorias: uma associada aos cursos d'água superficiais e outra localizada, resultante da concentração de água na superfície do terreno [3]. Ainda em relação a esta divisão, De Vries e Simmers [7] discutiram uma divisão conceitual em três tipos referenciados à distribuição espacial:

- Recarga Direta: é um processo uniformemente distribuído que acontece abaixo do ponto de impacto da precipitação por movimento vertical através da zona não-saturada;
- Recarga Indireta: descreve os processos onde a recarga ocorre por características introduzidas pela urbanização, assim como por rios e depressões de superfícies topográficas (reservatórios, lagos, etc.).
- Recarga Localizada: é um processo pontual de recarga, onde a água move-se em curtas distâncias lateralmente antes da infiltração.

Os estudos de estimativa de recarga baseados em dados da zona superficial e da não-saturada proporcionam estimativas da recarga potencial, enquanto que os estudos que se fundamentam em dados da zona saturada proporcionam, geralmente, estimativas da recarga real [5].

A água efetivamente infiltrada não é, necessariamente, o resultado de um único evento de chuva, mas pode representar uma série de precedentes eventos de chuva. Dependendo das características do aquífero, parte da água infiltrada pode provocar uma elevação no nível freático, e conseqüentemente um aumento no gradiente de descarga.

O início do processo de recarga ocorre após um determinado intervalo de tempo da precedente precipitação, devido à distribuição daquela água precipitada para os outros componentes do balanço hídrico subterrâneo (evapotranspiração, fluxo de base, armazenamento sub-superficial, etc).

Assim, se os métodos que relacionam eventos de chuva diretamente com níveis de água subterrânea forem aplicados para flutuações do nível d'água durante esse intervalo de defasagem, toda a água que contribui para a recarga deve ser considerada. Para curtos períodos de tempo (horas ou alguns dias), supõe-se que a água infiltrada entra imediatamente em armazenamento, e é este intervalo para o qual a aplicação do método é mais apropriada. O intervalo de defasagem é crítico para o sucesso deste método. Se a água é transportada ao nível d'água a uma taxa significativamente mais lenta, então o método é de pouco valor. No entanto, ainda existe a possibilidade de uma função ser introduzida para acomodar a defasagem de umidade pela zona não-saturada para nível freático [6].

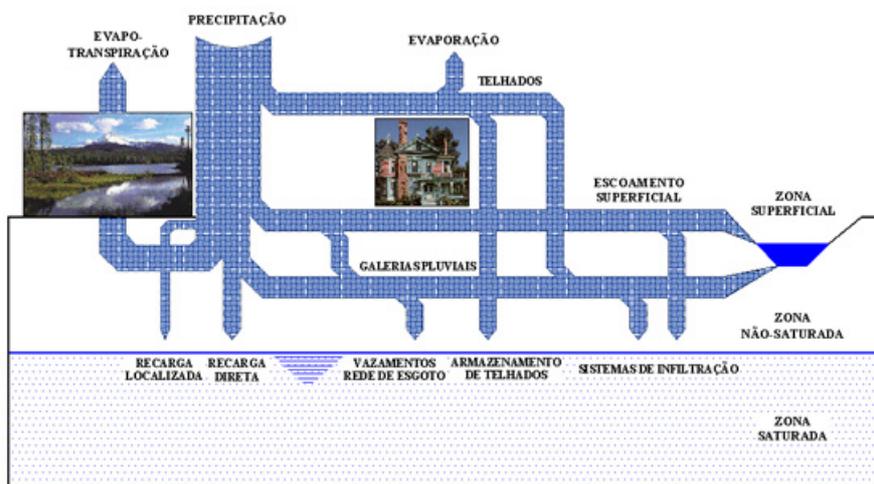
A medida de flutuações do nível d'água em piezômetros e em poços de observação são uma faceta importante de muitos estudos de água subterrânea. No entanto, oscilações no nível d'água podem resultar de uma variedade de fenômenos hidrológicos, alguns naturais e alguns induzidos pelo homem (evapotranspiração, pressão atmosférica, variações na temperatura, bombeamento de poços e mudanças naturais ou induzidas na superfície freática), que podem conduzir a flutuações do nível d'água, e não representarem a verdadeira recarga subterrânea [9]. Em muitos casos, pode

haver mais do que um mecanismo operando simultaneamente, e para que as medidas sejam interpretadas corretamente é importante o entendimento dos vários fenômenos atuantes.

Para aplicação de qualquer método de estimativa de recarga, todos os fatores e fatos citados acima devem ser considerados, ou ao menos previstos. Em área urbana, a estimativa da recarga é ainda mais complexa, principalmente devido à presença de diversas fontes e trajetórias de recarga.

### 3.3. Recarga em área urbana

Ambientes urbanos alteram significativamente a natureza da recarga nos respectivos aquíferos subjacentes. As fontes e percursos da recarga subterrânea em áreas urbanas são mais numerosos e complexos do que em ambientes rurais (Figura 3). A recarga direta é reduzida, porém pode haver contribuições adicionais a partir do aumento do escoamento superficial, assim como de fontes introduzidas pela urbanização, como vazamentos da rede de água e esgoto [10].



**Figura 3 – Trajetórias de recarga subterrânea em área urbana (Modificado de [11])**

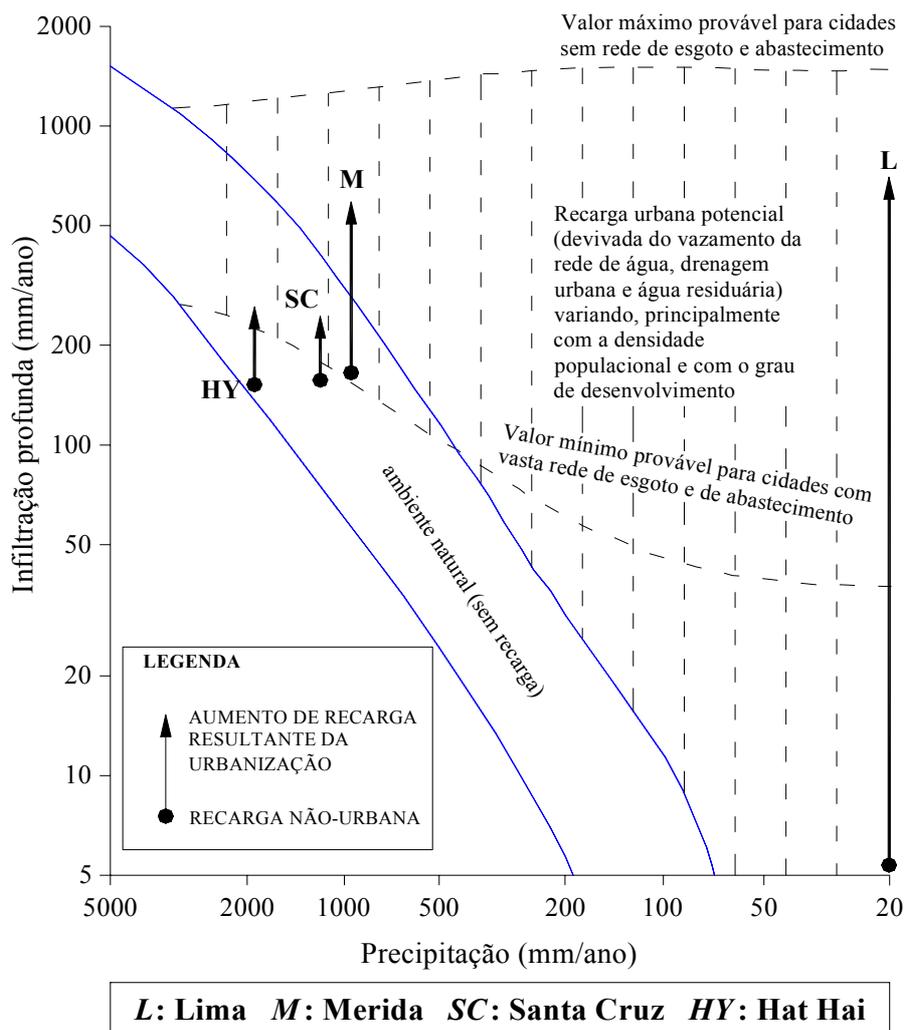
No meio urbano existem grandes áreas impermeáveis, no entanto esta perda de áreas favoráveis à infiltração, é compensada ou mesmo superada pela existência de diversas fontes de recarga indireta. A infra-estrutura do saneamento básico (abastecimento de água e rede coletora de esgotos) e a drenagem pluvial geram grandes quantidades de recarga por vazamentos. Em quase todos os ambientes (Figura 4), a urbanização conduz a um aumento na recarga [11].

As principais fontes extras de recarga, introduzidas em área urbana são [3]:

- Vazamentos da rede de esgoto e de fossas sépticas;
- Vazamentos do sistema de distribuição de água;
- Irrigação de parques públicos e residenciais;
- Vazamentos do sistema de drenagem pluvial;

- Vazamentos de sistemas de efluentes domésticos e industriais;
- Infiltração concentrada em enchentes (lançamento da água pluvial no leito do rio).

Em relação às diversas fontes indiretas de recarga, Lerner [11] afirmou que os efeitos resultantes das perdas da rede de água são mais importantes do que os efeitos provocados por vazamentos da rede de esgoto. Taxas de vazamentos de 20 a 25% são comuns, e taxas acima de 50% já foram observadas em redes de abastecimento, resultando em grandes montantes de recarga [12].



**Figura 4 – Aumento potencial na recarga para aquíferos livres devido à urbanização (Modificado de [11])**

### 3.4. Estimativa de Recarga

Há muitos métodos disponíveis para quantificar a recarga subterrânea assim como há diferentes fontes e processos de recarga. Cada método tem suas próprias limitações em termos de aplicabilidade e confiança. Por isso, um estudo de quantificação da recarga subterrânea deve prever a seleção do método apropriado de acordo com as escalas de tempo e espaço requeridas [5].

Os métodos mais utilizados e promissores para estimativa da recarga, atualmente, são o Método do Balanço de Massa de Cloreto (CMB – *Chloride Mass Balance*), o Método da Precipitação Cumulativa (CRD – *Cumulative Rainfall Departure*), o Método de Flutuação da Superfície Piezométrica (WTF – *Water Table Fluctuation*), a Modelação Subterrânea (GM – *Groundwater Modelling*), o Método EARTH (*Extended model for Aquifer Recharge and Moisture Transport through unsaturated Hardrock*) e o Método de Flutuação do Volume Saturado (SVF – *Saturated Volume Fluctuation*). Particularmente, os métodos baseados em relações entre precipitação e variações da superfície piezométrica têm um maior potencial de predizer a recarga subterrânea [13].

Em área urbana, os métodos utilizados para estimar a recarga em escala local incluem o uso de flutuações do nível d'água e traçadores químicos, principalmente. Em estudos em escala regional o interesse não é mais identificar fontes individuais de recarga, e sim mostrar que fontes individuais (como vazamento da rede de água e esgoto) existem e têm um impacto na estimativa da recarga urbana. O uso de traçadores químicos e do balanço hídrico são, provavelmente, os únicos métodos viáveis a esta escala [11].

A seguir são discutidos em detalhes o Método WTF (*Water Table Fluctuation*) e o parâmetro principal envolvido na estimativa por este método, o conceito de rendimento específico.

### 3.4.1. WTF (*Water Table Fluctuation*)

O método de Flutuação da Superfície Piezométrica (WTF – *Water Table Fluctuation*) é a técnica mais amplamente usada para estimativa da recarga. O método WTF só é aplicável aos aquíferos livres (não-confinados) e requer o conhecimento do rendimento específico e das variações nos níveis d'água ao longo do tempo. As vantagens desta aproximação incluem sua simplicidade e uma sensibilidade aos mecanismos do movimento da água na zona não-saturada [6].

O método de Flutuação da Superfície Piezométrica (WTF) baseia-se na premissa de que as elevações nos níveis d'água em aquíferos não-confinados são devidas à água de recarga subterrânea chegando na superfície piezométrica. A recarga é calculada como ([6]; [5]):

$$R = S_y \frac{dh}{dt} = S_y \frac{\Delta h}{\Delta t} \quad (1)$$

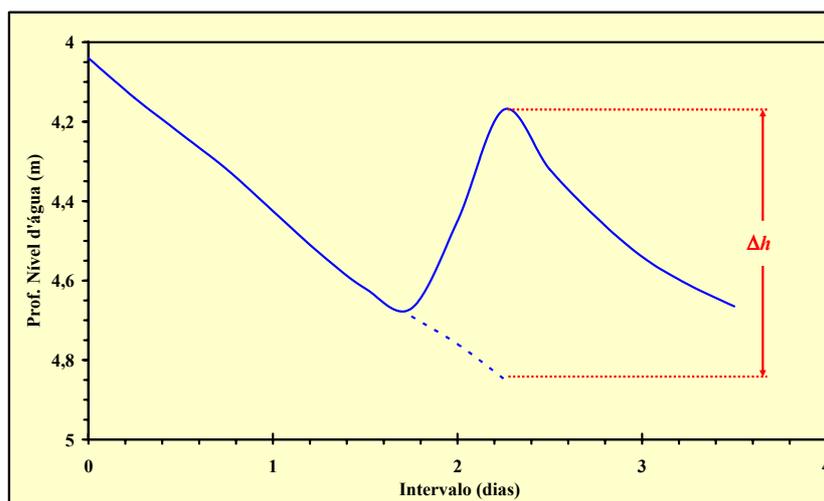
onde  $S_y$  é o rendimento específico,  $h$  é a altura do nível freático, e  $t$  é o tempo. O coeficiente de armazenamento de um aquífero livre é virtualmente igual ao rendimento específico, sendo da ordem da porosidade efetiva do meio.

A Eq. (1) assume que a água que atinge o nível freático entra imediatamente em armazenamento e que todos os outros componentes do balanço hídrico subterrâneo

(evapotranspiração subterrânea, fluxo de base, entrada e saída de fluxo sub-superficial) são nulos durante o período de recarga.

A aplicação da Eq. (1) para cada elevação individual do nível d'água determina uma estimativa da recarga total, onde  $\Delta h$  é igual à diferença entre o pico de subida e ponto mais baixo da curva de recessão antecedente extrapolada até o instante do pico [6]. A curva de recessão antecedente é o traço que a hidrógrafa do poço de monitoramento teria seguido na ausência de elevação do nível d'água (Figura 5). Essa manipulação é subjetiva e tenta acomodar a função de defasagem entre o início da precipitação e conseqüente início do processo de recarga, resultante do processo natural de descarga.

Para uma estimativa da recarga líquida,  $\Delta h$  é a diferença em altura entre o segundo e o primeiro instantes de medida do nível d'água. A diferença entre a recarga total e a recarga líquida é igual à soma da evapotranspiração subterrânea, do escoamento básico e do fluxo líquido sub-superficial da bacia. Com algumas suposições adicionais, o método WTF pode ser usado para calcular quaisquer destes parâmetros [6].



**Figura 5 – Elevação hipotética do nível d'água em poço em resposta a precipitação (Modificado de [6])**

O método WTF pode ser visto como uma aproximação integrada e não como uma medida pontual quando comparado com os métodos aplicados na zona não-saturada [6]. No entanto, o método tem as seguintes limitações:

- O método é mais bem aplicado a níveis freáticos rasos que exibem súbitas elevações e declínios do nível d'água. Aquíferos profundos podem não exibir súbitas variações, resultado de frentes de umidade que tendem a dispersar-se ao percorrer longas distâncias ([6]; [5]);
- As taxas de recarga variam substancialmente dentro de uma bacia, devido a diferenças na topografia, geologia, declividade da superfície do terreno, vegetação, e outros fatores. A

maior dificuldade está na locação dos piezômetros que representem espacialmente as fontes de recarga [6]. Um fator relevante à locação de piezômetros é o difícil acesso em áreas urbanas [11].

- A taxa de recarga não pode ser constante para o evento. Se a taxa de recarga for constante e igual à taxa de descarga, os níveis d'água não mudariam e o método WTF estimaria recarga nula [6].
- O nível da água subterrânea sobe e desce em resposta a muitos fenômenos diferentes e as flutuações nem sempre são indicativas de recarga ou descarga de água subterrânea [6]. Geralmente, níveis d'água subterrânea flutuam de acordo com as características dos eventos de precipitação (quantidade, duração e intensidade) e de várias variáveis hidrogeológicas (topografia, espessura da zona não-saturada e composição dos materiais da zona saturada e não-saturada da formação) [14].
- A incerteza gerada por este método está relacionada à precisão com que o rendimento específico pode ser determinado e até que ponto as suposições inerentes ao método são válidas [6].

Uma elevação do nível d'água representa os efeitos combinados da recarga para um evento de precipitação e da precedente condição de descarga. Por isso, taxas de recarga podem ser superestimadas pelo método WTF [6].

### 3.4.2. Rendimento Específico

O rendimento específico é um parâmetro usado na obtenção da recarga, principalmente, nos métodos que utilizam flutuações do nível d'água (WTF – *Water Table Fluctuation*; CRD – *Cumulative Rainfall Departure*). Contudo, os valores relatados para o rendimento específico na literatura são variáveis, assim como os métodos para sua obtenção. Outras vezes, acontece a substituição do parâmetro *rendimento específico* por algum outro (porosidade efetiva, coeficiente de armazenamento).

O termo *specific yield* (rendimento específico) foi proposto por Meinzer [15]. O rendimento específico de um solo (ou rocha) pode ser definido como a proporção do volume d'água que, depois de saturado, é drenado por gravidade com relação ao seu próprio volume [15]. No caso de um aquífero freático, a água é realmente drenada dos vazios quando o nível freático tem um rebaixamento. Porém, nem toda água contida nos poros é removida pela drenagem gravitacional. Certa quantidade de água é aprisionada nos interstícios entre os grãos, por forças moleculares e tensões superficiais. Por isso, o armazenamento de um aquífero freático é menor do que a

porosidade por um fator denominado de retenção específica [16]. A seguinte fórmula é geralmente usada ([17]; [18]):

$$S_y = n - S_r \quad (2)$$

onde,  $S_y$  é o rendimento específico,  $n$  é a porosidade (todos os poros estão interconectados) e  $S_r$  é a retenção específica.

O coeficiente de armazenamento (*storage coefficient*) pode ser definido como o volume de água que um aquífero desprende ou armazena por unidade de área superficial do aquífero por variação unitária na componente de carga normal àquela superfície. O armazenamento específico (*specific storage*) de um aquífero é a quantidade de água armazenada ou liberada por unidade de volume da formação devido à compressibilidade do arranjo mineral e dos poros com água por variação unitária na componente de carga normal àquela superfície [4].

Em um aquífero não-confinado, o nível de saturação aumenta ou diminui em função das mudanças no armazenamento. Quando o nível d'água rebaixa, a água é drenada dos poros, e este armazenamento ou liberação de água é devido ao rendimento específico da formação [4]. Para um aquífero não-confinado, o armazenamento é encontrado pela seguinte equação:

$$S = S_y + h \cdot S_s \quad (3)$$

onde  $S$  é o coeficiente de armazenamento,  $S_y$  é o rendimento específico,  $h$  é a espessura da zona saturada e  $S_s$  é o armazenamento específico da formação.

O valor de  $S_y$  é muito maior do que o valor de  $h \cdot S_s$  para um aquífero não-confinado [4]. Por isso, o coeficiente de armazenamento, de um aquífero não-confinado, também pode ser referido como rendimento específico ([19]; [4]).

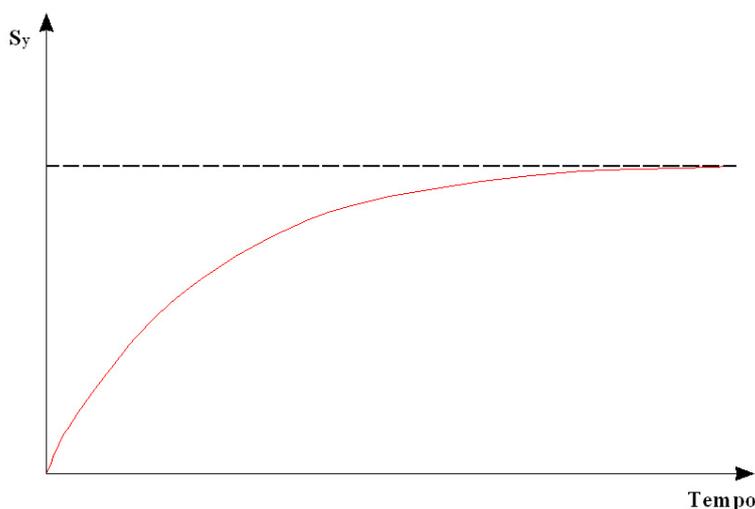
Outro termo que precisa ainda ser definido é a capacidade de campo (*field capacity*). A capacidade de campo é a quantidade de água aprisionada no solo após o excesso gravitacional ter sido drenado e após o movimento descendente de água ter diminuído sensivelmente ([20] *apud* [6]). A capacidade de campo é equivalente à retenção específica [6]. O complemento da capacidade de campo ( $c_0$ ), isto é, o volume de água drenado por gravidade de um volume unitário de solo saturado, é denominado de porosidade efetiva (ou útil) e é denotado por  $n_e$  [16].

$$n_e = n - c_0 \quad (4)$$

O termo *porosidade efetiva* também é frequentemente usado no contexto de quantificação da recarga. Porém, não se deve confundir este termo com a porosidade efetiva que se refere ao fluxo através de um meio poroso [16].

Bear [16] resumiu que para um solo homogêneo e isotrópico e uma superfície freática muito profunda, a retenção específica é idêntica à capacidade de campo, e a porosidade efetiva é idêntica ao rendimento específico.

O rendimento específico é tratado como um termo de armazenamento, independente do tempo, que em teoria responde pela liberação instantânea de água armazenada. Na realidade, a liberação de água não é instantânea [6]. Sob certas condições, o rendimento específico torna-se dependente do tempo, tendendo a um determinado valor (Figura 6) [19].



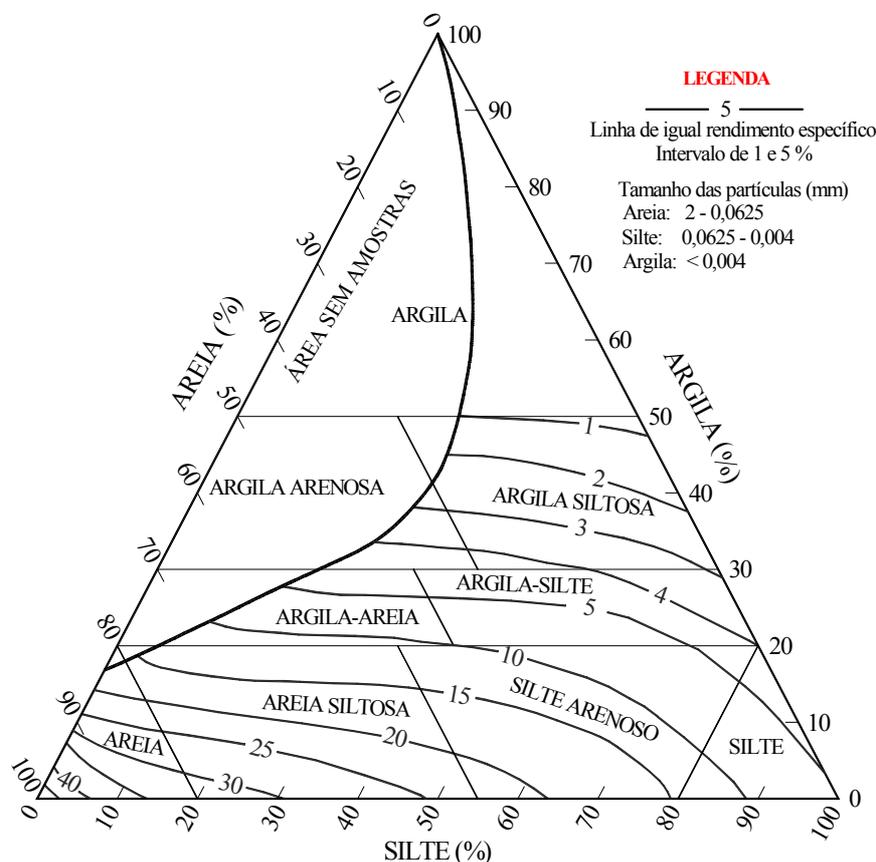
**Figura 6 – Dependência do rendimento específico com o tempo [19]**

O rendimento específico ( $S_y$ ) pode ser adotado como sendo igual ao coeficiente de armazenamento do aquífero ( $S$ ) para o caso de um aquífero freático, uma vez que esse último termo possui maior praticidade quando se realiza uma estimativa de recarga e ao maior número de citações, principalmente, na literatura em língua portuguesa. O termo porosidade efetiva ( $n_e$ ) deve ser usado com cautela na estimativa da recarga subterrânea, uma vez que o valor da porosidade efetiva corresponde a um valor máximo provável para o rendimento específico.

O rendimento específico pode ser determinado por ensaios de laboratório e de campo e através de relações empíricas com outras grandezas. Contudo, não existe ainda um método e um ensaio que realmente definam o valor real do rendimento específico, resultando assim um alto grau de incerteza. Essa incerteza estaria contida nas mesmas imprecisões do uso de valores mencionados na literatura.

A Figura 7 mostra uma classificação triangular do solo baseada nas porcentagens de materiais constituintes (argila, areia e silte) e mostra linhas de igual rendimento específico. Pode ser visto na Figura 7 que o rendimento específico aumenta rapidamente quando a porcentagem de areia aumenta e as porcentagens de silte, e especialmente argila, diminuem.

Nos ensaios de laboratório, o rendimento específico é usualmente determinado por medidas da porosidade e retenção específica e aplicação da Eq. (2). Nos ensaios de campo, os valores do rendimento específico para aquíferos não-confinados são obtidos geralmente da análise de testes de aquífero conduzidos por um período de horas ou dias, com o *plot* da curva rebaixamento vs. tempo, e analisando-a com curvas características desenvolvidas por diversos autores ([21], [22], [23]).



**Figura 7 – Triângulo de classificação textural – Relação entre tamanho da partícula e rendimento específico (Modificado de [24] apud [4])**

Uma formulação empírica para a avaliação do rendimento específico é a equação de Biecinski [25] que relaciona o valor do rendimento específico com o valor da condutividade hidráulica através da seguinte expressão:

$$S_y = 0,117 \cdot \sqrt[3]{K} \tag{5}$$

para a condutividade hidráulica K expressa em m·dia<sup>-1</sup>.

Pode-se concluir que o valor real do rendimento específico ou do coeficiente de armazenamento (para o caso de aquífero freático) possui enorme discrepância, para uma mesma classe de material. Por isso, não se pode afirmar que o valor do coeficiente de armazenamento obtido através de ensaio de laboratório ou de campo ou através de formulações empíricas possui razoável precisão, e, por conseguinte, o grau de incerteza e confiabilidade para aplicação no cálculo da estimativa de recarga. Uma aproximação aceitável pode ser alcançada, quando são conhecidos os

tipos de materiais constituintes, por comparação com os valores relatados na literatura especializada.

#### 4. RESULTADOS

O Método de Flutuação da Superfície Piezométrica baseia-se em medidas periódicas dos níveis d'água dos poços de monitoramento, de modo a obter a variação dos valores de carga hidráulica por determinado período de tempo. Essas medidas, no presente estudo, foram realizadas em intervalos semanais, variando de 5 a 9 dias as medidas consecutivas. As flutuações da carga hidráulica avaliadas ocorreram no ano hidrológico de fevereiro de 2004 a janeiro de 2005. A Figura 8 mostra a variação da carga hidráulica, a precipitação ocorrida e as extrapolações avaliadas para o método WTF, do piezômetro PM 10 ao longo do período monitorado.

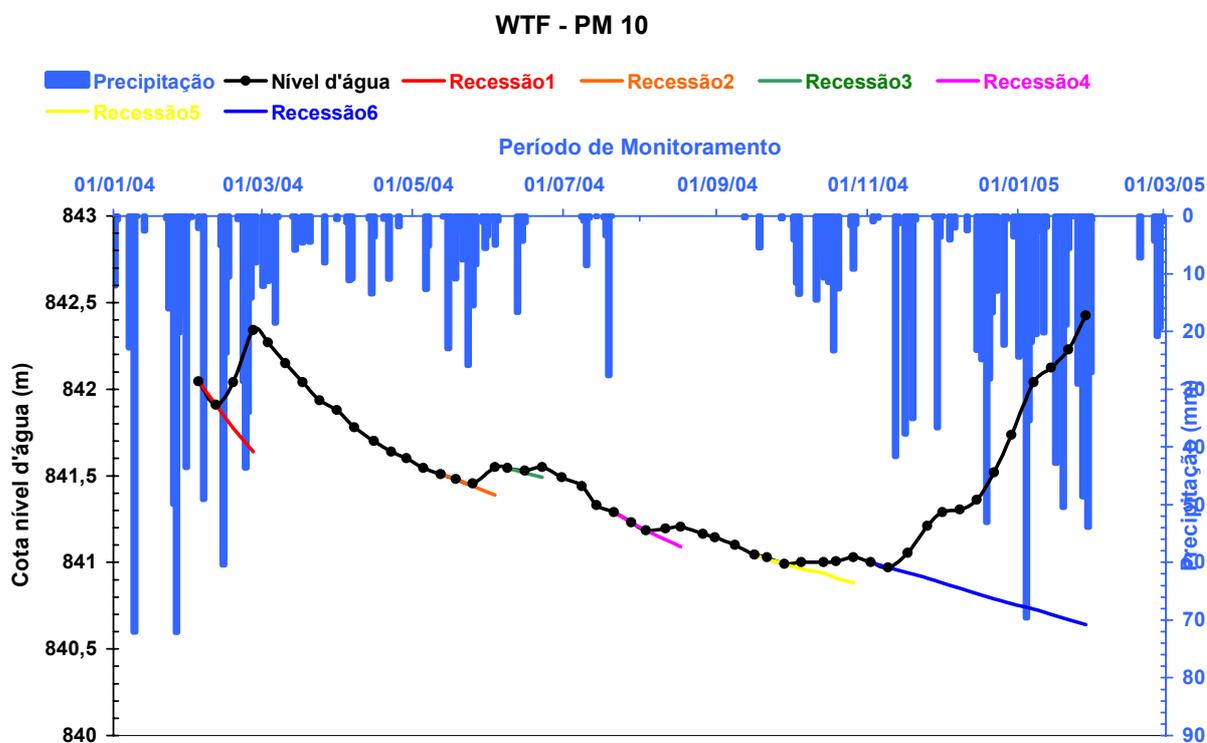


Figura 8 – Variação piezométrica PM 10 – fevereiro de 2004 a janeiro de 2005

Na quantificação da recarga pelo método de Flutuação da Superfície Piezométrica (WTF), os dados foram obtidos a partir de 19 poços de monitoramento que perfazem a rede permanente de monitoramento de água subterrânea das sub-bacias citadas. No entanto, não foram considerados os piezômetros PM 05, PM 09, PM 14 e PM 16 por existir a possibilidade de interferências de fontes de recarga induzida, fundamentada na elevação de seus respectivos níveis piezométricos.

Na Tabela 1 são mostrados os valores de  $\Delta h$  e  $S_y$  para cada piezômetro considerado, e a conseqüente recarga e taxa de recarga no ano hidrológico em estudo. Os valores do rendimento específico foram avaliados a partir da equação de Biecinski [25], utilizando os dados de

condutividade hidráulica apresentados por Maziero *et. al.* [26]. Os valores da recarga  $R$  foram calculados individualmente para cada piezômetro, utilizando a equação 1, para o período de 1 ano..

Tabela 1 – Taxas e valores da recarga para o período de fevereiro de 2004 a janeiro de 2005

Piezômetro	$\Delta h$ (m)	$S_y$	$R$ (m)	$P$ (mm)	$r$ (%)
PM 18	3,62	0,15	0,54	1596,5	34,00%
PM 01	2,14	0,11	0,24	1596,5	14,76%
PM 03	1,95	0,11	0,22	1596,5	13,47%
PM 06	1,29	0,11	0,14	1596,5	8,86%
PM 07	2,70	0,11	0,30	1596,5	18,63%
PM 08	2,85	0,11	0,31	1596,5	19,63%
PM 11	3,30	0,11	0,36	1596,5	22,73%
PM 12	2,17	0,11	0,24	1596,5	14,97%
PM 15	2,34	0,11	0,26	1596,5	16,10%
PM 02	1,45	0,09	0,13	1596,5	8,19%
PM 04	1,67	0,09	0,15	1596,5	9,42%
PM 10	2,97	0,09	0,27	1596,5	16,73%
PM 17	2,29	0,09	0,21	1596,5	12,91%
PM 19	3,38	0,09	0,30	1596,5	19,08%

Com base na Tabela 1 foi determinado um valor médio de recarga total de 261,7 mm/ano. Este valor representa 16,39% do total registrado de chuvas (1596,5 mm) para o ano hidrológico correspondente ao período de fevereiro de 2004 a janeiro de 2005. Cumpre observar que este valor refere-se à recarga total, a qual é superior à recarga líquida, uma vez que as descargas não são consideradas nessa estimativa.

## 5. CONCLUSÕES

Um entendimento dos processos envolvidos na caracterização da água subterrânea em centros urbanos torna-se cada vez mais fundamental, à medida que a taxa de exploração iguala ou mesmo supera o volume sustentável.

Foi determinada a recarga subterrânea, em aquífero freático, a partir de piezômetros que compõem a rede permanente de monitoramento de água subterrânea nas sub-bacias adjacentes do Gregório e do Tijuco Preto, região central do Município de São Carlos, SP. Para estimativa da recarga foi utilizado o Método de Flutuação da Superfície Piezométrica (*WTF – Water Table Fluctuation*).

O método WTF apesar de ser simples, fornece uma estimativa razoável da recarga, desde que seja feita uma análise dos dados disponíveis e uma avaliação de prováveis processos e fontes de recarga indireta.

A estimativa de recarga deve ser vista como um processo iterativo, nunca como um cálculo definitivo devido às incertezas envolvidas.

## 6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, da FAPESP, da Escola de Engenharia de São Carlos – EESC-USP, da Prefeitura Municipal de São Carlos e do Projeto FNDCT-FINEP, Ref. 2128/02.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] EMBRAPA-CCPSE (1999). *Microbacia Hidrográfica do Ribeirão Canchin: um modelo real de laboratório ambiental*. Boletim de Pesquisa, 5. Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos.
- [2] BORTOLUCCI, A.A. (1983). *Caracterização Geológico-Geotécnica da região urbana de São Carlos-SP, a partir de sondagens de simples reconhecimento*. 67p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- [3] LERNER, D.N. (1990). *Groundwater recharge in urban areas*. Atmos. Environment, 24 B(1), p. 29-33.
- [4] FETTER, C.W. (1994). *Applied Hydrogeology*. Macmillan: New York, 3<sup>rd</sup> ed., 691 pp.
- [5] SCANLON, B.R.; HEALY, R.W.; COOK, P.G. (2002). *Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge*. Hydrogeology Journal, 10, p. 18-39. DOI 10.1007/s10040-0010176-2.
- [6] HEALY, R.W.; COOK, P.G. (2002). *Using groundwater levels to estimate recharge*. Hydrogeology Journal, 10, p. 91-109. DOI 10.1007/s10040-001-0178-0
- [7] De VRIES, J.J.; SIMMERS, I. (2002). *Groundwater Recharge: an overview of processes and challenges*. Hydrogeology Journal, 10, 1, p.5-17. DOI 10.1007/s10040-001-0171-7
- [8] BREDENKAMP, D.B.; BOTHA, L.J.; VAN TONDER, G.J.; van RENSBURG, H.J. (1995). *Manual on Quantitative Estimation of Groundwater Recharge and Aquifer Storativity*. Water Research Commission, Pretoria.
- [9] FREEZE, R.A.; CHERRY, J.A. (1979). *Groundwater*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 604p.
- [10] BARRETT, M.H.; HISCOCK, K.M.; PEDLEY, S.; LERNER, D.N.; TELLAM, J.H.; FRENCH, M.J. (1999). *Marker species for identifying urban groundwater recharge sources – the Nottingham case study*. Water Resources, 33 (14), p.3083–3097.
- [11] LERNER, D.N. (2002). *Identifying and quantifying urban recharge: a review*. Hydrogeology Journal, 10, p. 143-152.

- [12] LERNER, D.N. (1986). *Leaking pipes recharge groundwater*. Ground Water, 24 (5), p. 654-662.
- [13] XU, Y.; BEEKMAN, H.E (Eds) (2003). *Groundwater recharge estimation in Southern Africa*. UNESCO IHP Series n° 64, UNESCO, Paris. ISBN 92-9220-000-3.
- [14] MOON, S.; WOO, N.C.; LEE, K.S. (2004). *Statistical analysis of hydrographs and water-table fluctuation to estimate groundwater recharge*. Journal of Hydrology, 292, p. 198-209.
- [15] MEINZER, O.E. (1923). *The occurrence of groundwater in the United States with a discussion of principles*. U.S. Geol. Survey Water Supply, Pap 489, 321pp.
- [16] BEAR, J. (1972). *Dynamics of fluids in porous media*. American Elsevier, Environmental Science Series, New York, NY, 764 pp.
- [17] Dos SANTOS Jr., A.G.; YOUNGS, E.G. (1969). *A study of the specific yield in land-drainage situations*. Journal of Hydrology, 8:59-81.
- [18] DUKE, H.R. (1972). *Capillary properties of soils – influence upon specific yield*. Trans. Am. Soc. Agric. Eng., 15:688-691.
- [19] BEAR, J. (1979). *Hydraulics of groundwater*. McGraw-Hill, New York, NY, 569 pp.
- [20] VEIHMEYER, F.J.; HENDRICKSON, A.J. (1931) *The moisture equivalent as a measure of the field capacity of soils*. Soil Science, 32:181-194.
- [21] BOULTON, N.S. (1963) *Analysis of data from non-equilibrium pumping tests allowing for delayed yield from storage*. Proc. Inst. Civil Eng., 6:469-482.
- [22] NEUMAN, S.P.; WITHERSPOON, P.A. (1972). *Field determination of hydraulic properties of leaky multiple aquifer systems*. Water Resources Research, 8:1284-1298.
- [23] WALTON, W.C. (1970). *Groundwater resource evaluation*. McGraw-Hill, New York, NY, 664 pp.
- [24] JOHNSON, A.I. (1967). *Specific yield – Compilation of specific yields for various materials*. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 1662-D: 74pp.
- [25] PAZDRO, Z. (1983). *Hydrogeologia Ogólna*, W.G. Warszawa, p.575. In: ALVAREZ, R.H.; NIEDZIELSKI, H. (1996). *Estimacion de la recarga en la subcuenca Rio de las Avenidas Pachuca Hidalgo México*. In: Congresso Latino-Americano de Hidr. Sub., 3, México, 1996. Anais do 3° Congresso Latino-americano de Hidr. Sub., México: ALHSUD, p.35-46.
- [26] MAZIERO, T.A.; CARNEIRO, P.H.; WENDLAND, E. (2004). *Determinação da condutividade hidráulica de aquífero freático em área urbana do município de São Carlos*. In: XIII CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, Cuiabá - MT. Anais do XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. São Paulo-SP: ABAS p. 1-16.