

# RECARGA E FLUTUAÇÃO DO NÍVEL DA ÁGUA SUBTERRÂNEA EM SUB-BACIAS HIDROGRÁFICAS COM FLORESTA E CAMPO NATIVO<sup>1</sup>

*Cristiane DAMBRÓS<sup>2</sup>*

*José Luiz SILVÉRIO DA SILVA<sup>3</sup>*

## Resumo

Várias técnicas estão disponíveis para quantificar a recarga das águas subterrâneas, que faz parte do ciclo hidrológico. A recarga foi estimada com base nas flutuações do lençol freático. A área de estudo pertence a zona de afloramentos (ZA) do Sistema Aquífero Guarani (SAG), localizadas na borda da Bacia Sedimentar do Paraná, no município de Rosário do Sul, Estado do Rio Grande do Sul, extremo Sul do Brasil. Cinco poços de monitoramento foram instalados em profundidades entre 10 a 20 metros. Os níveis de flutuação de águas subterrâneas foram registrados durante dois anos (2009 - 2011) em registradores automáticos de nível e comparadas duas sub-bacias com diferentes usos da terra, campo nativo em área de 21 hectares e floresta de eucaliptos em área de 85 hectares. O método da Flutuação do Nível da Água - WTF foi usado em um aquífero livre pertencente aos arenitos da Formação Pirambóia. A série de registros de nível de água subterrânea foi de longa duração. Encontraram-se valores na faixa entre 1,36 - 4,25 metros. A recarga de água subterrânea foi estimada num longo período de duração de 721 dias. Essa foi de 170 milímetros na sub-bacia de campo nativo e, variando entre 60 a 220 milímetros, na sub-bacia com floresta de eucaliptos nos distintos poços de monitoramento. O intervalo de recarga apresentou variação entre 4,71% a 5,65% da precipitação total anual. Considera-se que os estudos sobre a recarga de um aquífero são cruciais para a conservação e gestão sustentável dos recursos hídricos, tanto a escala local do poço de monitoramento, quanto da bacia hidrográfica.

**Palavras-chave:** Recarga. Água subterrânea. WTF. SAG.

<sup>1</sup> Artigo obtido da Dissertação de Mestrado da autora, desenvolvida no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental - Área de Concentração em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria/RS.

<sup>2</sup> Geógrafa, Doutoranda em Geografia - IGCE/UNESP/Rio Claro - Av. 46A, nº. 911 - Bairro Vila Nova, Rio Claro (SP/Brasil), CEP: 13506-600 - Tel.: (+55 19) 9900-7787 - E-mail: cristianedambros@gmail.com

<sup>3</sup> Geólogo, Professor do Departamento de Geociência da Universidade Federal de Santa Maria/RS - Av. Roraima, s/nº. - Prédio 17, sala 1605/Campus UFSM, Santa Maria (RS/Brasil), CEP: 97105-900 - Tel.: (+55 55) 3220-8638 - E-mail: silverioufsm@gmail.com

## Abstract

### Recharge and fluctuation level of groundwater in sub-basins with forest and native field

Various techniques are available to quantify groundwater recharge, part of the hydrological cycle. The recharge was estimated based on the water table fluctuations during 721 days. The studied area belongs to the outcrop zones (ZA) of the Guarani Aquifer System/GAS, border of Paraná Sedimentary Basin, located in the Rosário do Sul city, Rio Grande do Sul state, Southern Brazil. Five monitoring wells were installed at depths between 10 to 20 meters. The levels of groundwater fluctuation were registered during two years (2009 - 2011). Was evaluated a series with duration. Were compared two sub-basins with different land uses, native field and eucalyptus forest. The Water Table Fluctuation – WTF method was used in one unconfined aquifer Pirambóia Formation. We found values in the range between 1.36 to 4.25 meters. The groundwater recharge estimated in the period was of 170 millimeters in the field sub-basin and ranging from 60 to 220 millimeters in the forested sub-basin. The range of recharge presented 4.71% to 5.65% of the annual total precipitation. Studies on the recharge of an aquifer are crucial for conservation and sustainable management of water resources, considering the scales locally at the monitoring well or regional at the river watershed.

**Key words:** Recharge. Groundwater. WTF. GAS.

## INTRODUÇÃO

A gestão dos recursos hídricos tem sido uma temática constante em pesquisas de âmbito nacional e internacional, inserida no contexto das discussões sobre sustentabilidade e “abastecimento hídrico”, quando este se relaciona com as políticas públicas. Os recursos hídricos constituem uma das principais preocupações mundiais, já que inúmeros problemas são causados pela falta ou inviabilidade no uso dessa fonte natural renovável, a exemplo da situação de muitas populações de baixa renda que se concentram, geralmente, em áreas de pouca disponibilidade hídrica e contam com o atendimento precário de suas necessidades.

Sabe-se que a escala de recursos hídricos é variável em dias, em anos e até em séculos, sendo determinante não só para a vida e bem-estar da humanidade, mas para a manutenção da Biosfera. Ações governamentais, como o incentivo à educação ambiental, promovem mudanças capazes de corrigir desequilíbrios causados por intervenções humanas, e medidas como essa buscam preservar o meio ambiente para as novas gerações.

No Brasil, tem-se atribuído crescente importância às investigações científicas orientadas para a avaliação das potencialidades e das vulnerabilidades de uso dos sistemas hídricos. Tais pesquisas priorizam enfoques visando à melhoria da qualidade ambiental, além da manutenção da qualidade de vida das populações e da biota que ocupam as áreas urbanas e rurais.

O presente trabalho busca diagnosticar e contribuir para a preservação dos recursos hídricos subterrâneos, para o seu uso sustentável e com o planejamento de ações de gerenciamento. Também destaca a necessidade de testar metodologias para estimativas de recarga da água subterrânea. Para tanto, foram selecionadas duas sub-bacias com diferente uso do solo: procura-se comparar uma sub-bacia com florestamento de eucaliptos (silvicultura) e outra de campo nativo. As duas sub-bacias são localizadas no município de Rosário do Sul/RS, na Bacia Sedimentar do Paraná, em zona de afloramento (ZA) do Sistema Aquífero Guarani – SAG (OAS/PEA, 2009), (SILVÉRIO DA SILVA et al., 2009) pertencente ao Bioma Pampa.

Comparando duas sub-bacias com diferentes usos de solo, este estudo pretende verificar a possibilidade de existirem ou não diferenças na infiltração no subsolo, estimando-

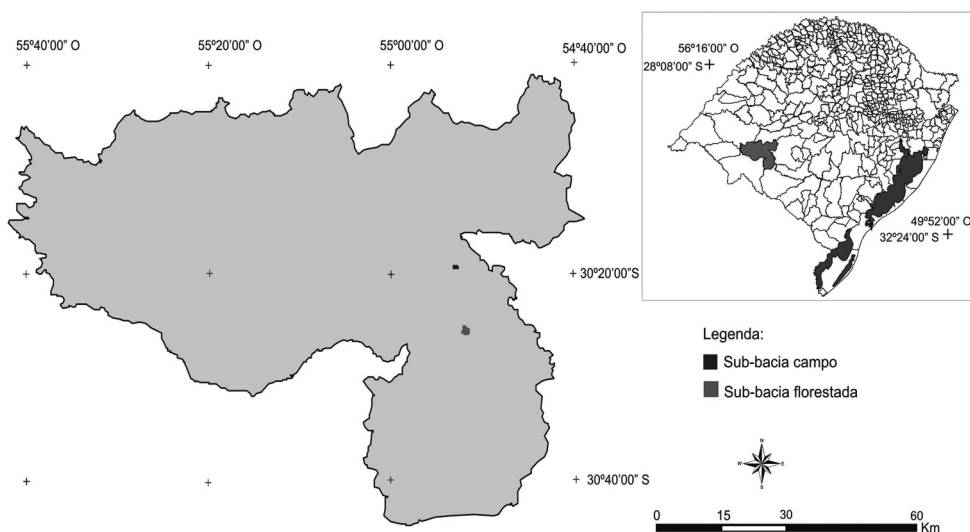
se a recarga subterrânea em aquífero poroso livre, através de monitoramento sistemático do nível da água na zona saturada, na interface solo/rocha.

Portanto, a busca por respostas, ainda incompletas, sobre o comportamento das águas subterrâneas representa o desafio deste trabalho, e os seus resultados podem servir como ferramenta para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos e para a aplicação em outras áreas sedimentares porosas. Ademais, contribui com a formação de recursos humanos, possibilitando o debate na comunidade acadêmica e nos Comitês de Bacias Hidrográficas.

Esta pesquisa insere-se no Projeto ASUB/UFCG/UFAL/UFMS "Integração dos instrumentos de Outorga, Enquadramento e cobrança para a Gestão de Águas Subterrâneas", e somam-se aos demais trabalhos do Laboratório de Hidrogeologia da Universidade Federal de Santa Maria, em relação às águas subterrâneas, suas potencialidades e vulnerabilidades (DESCOVI FILHO, 2009; FARIAS, 2011; DAMBRÓS, 2011; MARTELLI, 2012).

## CARACTERIZAÇÃO DAS SUB-BACIAS HIDROGRÁFICAS COM FLORESTA E CAMPO NATIVO

As áreas pesquisadas são duas sub-bacias, inseridas na Bacia Hidrográfica do Rio Santa Maria, (U-70) da Região Hidrográfica do Rio Uruguai (RS/SEMA, 2004). Ambas estão situadas no Município de Rosário do Sul/RS, na Microrregião Campanha Central. A sub-bacia com uso do solo de campo nativo, medindo 21 ha, foi monitorada por um poço de profundidade de 20m. Já a sub-bacia com florestamento de eucaliptos, com área de 85 ha, foi monitorada por quatro poços perfurados com profundidades entre 10 e 18 m, como localiza a figura 1.



**Figura 1 - Localização das sub-bacias hidrográficas (de campo e florestada) no Município de Rosário do Sul/RS, Bacia Hidrográfica do Rio Santa Maria/ BHRSM – (U-70), Bacia Sedimentar do Paraná**

As sub-bacias estão localizadas na (ZA) SAG (OEA/PSAG/PEA, 2009), no Bioma Pampa. A figura 2 apresenta o poço freático com profundidade de 20m, P1, que foi monitorado na sub-bacia de campo. Enquanto, na sub-bacia com atividade de silvicultura, foram monitorados quatro poços, conforme mostra a figura 3, que ilustra o poço P2, localizado no interior da sub-bacia florestada. E, geomorfologicamente, as duas sub-bacias hidrográficas situam-se na Depressão Central do Rio Grande do Sul e abrangem as unidades litológicas da Bacia Sedimentar do Paraná, constituídas pelos arenitos da Formação Pirambóia/SAG (BRASIL/CRPM/2008).

Para esclarecimento, no Estado de São Paulo, o arcabouço estratigráfico do (SAG) é constituído pelos arenitos Triássicos da Formação Pirambóia, e Juro-Cretáceos da Formação Botucatu (PAULA e SILVA et al., 2008). Estes autores dizem que essa unidade foi formalmente definida por Soares (1973, 1975), que a descreveu como constituída por um membro inferior, mais argiloso, composto de arenitos finos intercalados por frequentes camadas de argilito e de folhelhos arenosos e sílticos, com estratificação plano-paralela, e por um membro superior, composto de bancos de arenitos pouco a muito argilosos, com estratificação cruzada planar tangencial, de pequeno e médio porte, sucedidos por bancos de arenitos muito argilosos com estratificação plano-paralela, lamitos e argilitos, em repetição cíclica. Originalmente com deposição atribuída ao ambiente fluvial meandrante psamítico (SOARES, 1973).

Caetano-Chang (1997) apresentou uma revisão sobre a gênese da Formação Pirambóia indicando uma predominância da deposição eólica sobre a deposição fluvial, francamente subordinada, ocorrendo na região centroeste paulista. A unidade apresenta uma constituição essencialmente arenosa. Essa teria sido depositada em paleoambiente desértico com metassaturação em areias, onde se intercalam fácies de dunas com *foresets* de pequeno a grande porte, em arenitos, geralmente, de granulometria finos, regular a bem selecionados. Ainda, ocorrem fácies de interdunas úmidas, predominantes, compostas por arenitos siltosos com estruturas preservadas de ôndulas eólicas e bioturbações e fácies de interdunas secas e lençóis de areia. Essas são mais frequentes nas porções média e superior da unidade enquanto, as fácies de interdunas aquáticas ou de *overbank* são em geral, compostas por lamitos arenosos, mais frequentes na porção inferior da formação, onde se associam a fácies fluviais de rios temporários.

O SAG, no Estado do Rio Grande do Sul, Machado (2005) considera-o constituído por nove unidades hidroestratigráficas: 1) Pirambóia; 2) Sanga do Cabral; 3) Passo das Tropas I; 4) Passo das Tropas II; 5) Alemoa; 6) Caturrita; 7) Arenito Mata e 8) Guará. Estas unidades ocorrem em distintos blocos, separados por sistemas tectônicos, tais como o Sistema de Falhas Terra de Areia-Posadas (SFTA-P) e o Sistema de Falhas Jaguari-Mata (SFJM) de direção Noroeste, enquanto o Sistema de Falhas Dorsal de Canguçu (SFDC) apresenta direção Nordeste. A unidade hidroestratigráfica Pirambóia ocorre na fronteira oeste do estado, na porção central e no leste em condições aflorantes, podendo atingir até 500m de espessura em subsuperfície.

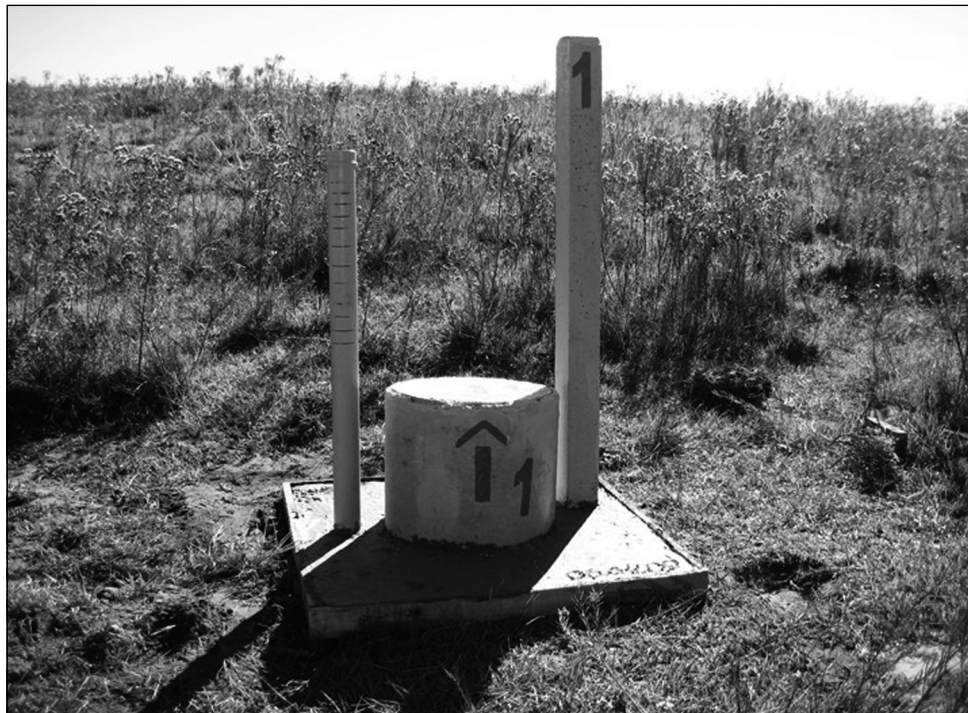
Para Machado e Freitas (2005) o Sistema Aquífero Sanga do Cabral/Pirambóia na categoria de aquíferos, é considerado com baixa a média possibilidade para águas subterrâneas em rochas e sedimentos com porosidade intergranular. Sua área aflorante, estende-se desde a fronteira do Estado do Rio Grande do Sul com o Uruguai, em uma faixa contínua até a região do Município de Taquari, na Depressão Central. Compõe-se de camadas síltico-arenosas, avermelhadas com matriz argilosa e arenitos finos a muito finos, avermelhados, com cimento calcífero. As capacidades específicas são muito variáveis, em geral entre 0,5 e 1,5 m<sup>3</sup>/h/m. A salinidade varia de 100 mg.L<sup>-1</sup> nas áreas aflorantes a mais de 300 mg.L<sup>-1</sup> nas confinadas. Na região central do estado são encontradas salinidades entre 3.000 e 5.000 mg.L<sup>-1</sup>.

Paula Soares et al. (2008) citam as significativas divergências quanto à idade e posição estratigráfica dos depósitos eólicos e fluviais da Formação Pirambóia e unidades

correlatas. Esses têm sido evidentes na literatura, especialmente na porção sul da Bacia do Paraná.

Neste trabalho adotam-se as concepções do Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Sul CPRM (2008), onde a Formação Pirambóia foi inserida no Grupo Passa Dois, sendo constituída por arenitos médios a finos, apresentando geometria lenticular bem desenvolvida, ambiente continental, eólico com intercalações fluviais. Sartori et al. (1995) descreveram ocorrências de duplas micras (biotita e muscovita) e concreções carbonáticas na Formação Sanga do Cabral, na porção central do estado. Enquanto a unidade hidroestratigráfica Alemoa é constituída por argilitos vermelhos com concreções carbonáticas, apresenta ocorrência de répteis fóssil facilmente identificada no terreno, servindo para separar unidades. Essa unidade constitui um Aquicludo, não transmitindo água, conforme Silvério da Silva et al. (2010).

A normatização para a classificação dos diferentes locais onde se podem encontrar acúmulos de água está previsto na Resolução nº 15/2001 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos, em seu Art. 1º, onde: I - Águas Subterrâneas - as águas que ocorrem naturalmente ou artificialmente no subsolo; II - Águas Meteóricas - as águas encontradas na atmosfera em quaisquer de seus estados físicos; III- Aquífero - corpo hidrogeológico com capacidade de acumular e transmitir água através dos seus poros, fissuras ou espaços resultantes da dissolução e carreamento de materiais rochosos; IV - Corpo Hídrico Subterrâneo - volume de água armazenado no subsolo. Considerando tal Resolução, as rochas aflorantes nas duas sub-bacias estão classificadas no terceiro item, ou seja, formam parte de um aquífero, um reservatório que constitui-se em um sistema poroso intergranular não confinado (livre).



**Figura 2 - Poço P1 (Profundidade de 20m), sua condição de paisagem campo nativo e seu entorno**

Os poços P2 e P5 foram perfurados com profundidades de 18m e 15m, respectivamente, e se localizam no interior da floresta implantada de eucaliptos. Suas cotas altimétricas são de 155 m e 136 m acima do nível médio do mar. Conforme ilustra a figura 3, o poço identificado como P2, situado na sub-bacia florestada com eucaliptos, está mais próximo do divisor de águas e o terreno apresenta maior inclinação que no caso dos demais, localizados em uma vertente suave, próximos ao vertedouro instalado no curso de água principal. Esse vertedouro serve para outras pesquisas da UFSM (BAUHARDT et al. 2012) e buscam realizar um balanço hídrico superficial subterrâneo BAUHARDT (no prelo).



**Figura 3 - Condição de paisagem do poço P2 localizado na sub-bacia florestada de eucaliptos, cota 155m**

O poço de monitoramento P3 tem 12m de profundidade. Ele está situado na interface da área florestada e da Área de Preservação Permanente (doravante APP), mantendo as características da paisagem e respeitando a legislação. A disposição dos poços é verificar o comportamento do aquífero, assim os poços P3, P4 e P5 apresentam-se alinhados em uma das vertentes da sub-bacia hidrográfica, ultrapassando os limites da área com eucaliptos.

O poço P4 foi perfurado na APP, a porção florestada com cobertura de vegetação natural da sub-bacia hidrográfica. Ele tem 10m de profundidade e encontra-se na Planície Aluvial, em uma vegetação de campo *sujo*. Esse poço de monitoramento é o localizado mais próximo do vertedouro.

Partindo das cotas altimétricas dos poços de monitoramento até o vertedouro, estimou-se, para a sub-bacia florestada, uma declividade média do terreno de 8,7%. Essa característica indica um relevo suave ondulado a ondulado, que é regionalmente denominado

coxilha (DE BIASI, 1992). As paisagens de coxilhas são compostas por vertentes suaves em elevações de pequena magnitude, termo regional adotado no Estado do Rio Grande do Sul.

Com efeito, partir dos aspectos morfológicos e geológicos, é possível enquadrar as áreas em estudo no tipo coxilhas, segundo a classificação de Ab'Saber (1970). As coxilhas são unidades de relevo com cotas altimétricas que podem variar de 60 metros a 200 metros acima do nível médio do mar, conforme Sartori (1979). Geralmente, elas são divisoras de águas de pequenas bacias hidrográficas, pois têm como característica morfológica a presença de colinas côncavas – convexas.

Cabe destacar que a sub-bacia com florestamento de eucaliptos apresentava, originalmente, uma vegetação de campo nativo, típico da região pampeana (Bioma Pampa). Nessa região, as principais atividades estão ligadas à criação extensiva de gado, para a qual se utiliza a própria gramínea natural e as pastagens de inverno. No período de verão são substituídas por lavouras de soja, em áreas mais elevadas, e por lavouras de arroz irrigado, nas planícies aluviais, onde o nível freático é raso.

É importante salientar que as duas sub-bacias hidrográficas em estudo, apresentam características geomorfológicas semelhantes. Ambas não apresentam planícies de inundação extensa, por ainda estarem em processo de esculturação do relevo (ravinas e vossorocas) e por constituírem as cabeceiras de bacias hidrográficas.

Ainda, com base na classificação dos tipos climáticos de Köppen, as duas áreas mencionadas estão contidas no tipo Cfa, em que o C corresponde ao tipo *clima temperado úmido quente*, marcado por verões quentes e invernos amenos. Esse tipo climático possibilita que a temperatura média do mês mais frio seja inferior a 18°C e superior a -3°C. Já a precipitação pluviométrica anual média, situa-se entre 1300 e 1600 mm (SARTORI, 1979).

As sub-bacias hidrográficas em estudo estão localizadas na subunidade de paisagem denominada Paisagens de Campo, pertencente à unidade de paisagem Depressão Central ou Periférica. Entre as suas principais características, destacam-se a cobertura vegetal de gramíneas associada à mata galeria, ao longo dos cursos de água, e a condição favorável à ocupação pastoril (SUERTEGARAY; GUASSELLI, 2004).

Ao analisar a organização do uso da terra, presente na sub-bacia hidrográfica de campo, o principal aspecto encontrado foi o uso destinado às atividades de pecuária. Nesta sub-bacia hidrográfica, o pecuarista utiliza-se da vegetação natural (gramíneas), para a alimentação de seus rebanhos: bovinos, bufalinos, entre outros.

Anterior ao florestamento, as duas sub-bacias hidrográficas tinham uso da terra semelhante, com a inserção da silvicultura como novo sistema de produção rural, por iniciativa privada estrangeira e também nacional e incentivada por políticas governamentais. Cabe mencionar que, respeitando a APP e a Reserva Legal, a sub-bacia hidrográfica florestada tem, atualmente, em sua totalidade, o plantio de eucalipto (DAMBRÓS et al., 2011; DAMBRÓS; SILVÉRIO DA SILVA, 2012).

Nesse contexto, os discursos são unânimes quando se referem ao incentivo a pesquisas que se propõem a investigar o comportamento dos aquíferos. Este trabalho aborda a recarga desses recursos, com o objetivo de subsidiar as políticas de gestão sustentável e a preservação desse recurso natural renovável, numa escala ainda pouco conhecida - em dias, décadas até em séculos (HEATH, 1983).

Existem vários métodos alternativos para se realizar estimativas de recarga subterrânea, e cada um deles assume premissas e incertezas. Os métodos mais utilizados para estimativa de recarga de água subterrânea são: 1) Método do Balanço de Massa de Cloreto; 2) Método da Precipitação Cumulativa; 3) Método da Modelação Subterrânea; 4) Método EARTH (*Extended Model for Aquifer Recharge and Moisture Transport Through Unsaturated Hardrock*); 5) Método do Balanço Hídrico; 6) Método Darcyniano e; 7) Método de Flutuação do Volume Saturado ou Flutuação do Nível D'água (*Water Table Fluctuation - WTF*) (XU; BEEKMAN, 2003; WAHNFRIED; HIRATA, 2005; PAIVA, 2006).

O *WTF* é um método que assume a precipitação pluviométrica anual como sendo a fonte de recarga de um aquífero livre. Sabe-se que estudos relacionados à flutuação do nível da água subterrânea e avaliações de recarga pelo método *WTF* ocorrem desde 1920. Mas esse método mantém-se atual e é largamente aplicado por hidrogeólogos brasileiros como, por exemplo, Maziero (2005), Barreto (2006), Paiva (2006), Carnier Neto (2006), Gomes (2008), Gouvêa (2009), Silvério da Silva et al. (2009) e Silvério da Silva e Farias (2013).

Estudos prévios de recarga subterrânea no SAG na região de São Carlos/São Paulo foram executados por Wendland et al. (2007), Barreto et al. (2007), Barreto (2008), Gomes (2008), Wendland e Rabelo (2009), Lucas et al. (2012), dentre outros.

Healy e Cook (2002) trazem uma discussão teórica sobre os métodos que estimam a recarga do lençol freático. Eles afirmam que a estimativa de recarga é extremamente importante para a gestão do sistema de águas subterrâneas e destacam a fácil aplicabilidade do método *WTF*. Tal método é uma simplificação *grosseira* de um fenômeno complexo, ou seja, do movimento da água subterrânea e do lençol freático.

Estudos desenvolvidos por pesquisadores argentinos e uruguaios, em áreas pertencentes a (ZA) do SAG, obtiveram respostas distintas quanto à estimativa de recarga. Montañó e Carrión (1990), Silva Busso (1999), Perez e Rocha (2002) e Pacheco (2004) encontraram, como resultados, estimativas de 3,0% a 3,6% da precipitação média anual (PSAG, 2007).

Scanlon et al. (2002) realizaram uma revisão das técnicas de avaliação da flutuação do nível da água em meios porosos subterrâneos da Austrália. E eles propuseram uma série de importantes cuidados na seleção do método de estudo.

O método *WTF* pode ser usado de duas formas. Ele possibilita estimativas de eventos (dias, semanas, meses) ou em períodos mais extensos (anos) e também permite a estimativa em escala local e regional. Esse método foi considerado o mais sensível entre três métodos analisados (WAHNFRIED; HIRATA, 2005). Ele tem como base a premissa de que os aumentos dos níveis das águas subterrâneas em aquíferos livres ocorrem em função da água de recarga do lençol freático (HEALY; COOK, 2002).

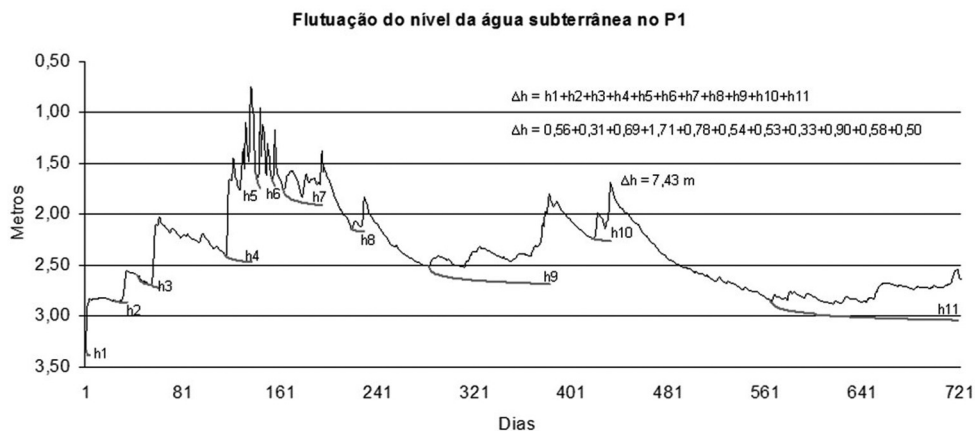
$$R = S_{y*} (dh/dt) = S_{y*} (\Delta h/\Delta t) \quad (1)$$

A Equação 1 apresenta os parâmetros avaliados. Sendo: ( $S_y$ ) - rendimento específico do meio poroso; ( $\Delta h$ ) - flutuação do nível freático; ( $\Delta t$ ) - período monitorado na pesquisa. Para a determinação do ( $\Delta h$ ), deve-se somar cada diferença entre os picos de ascensão e os pontos mais baixos da curva extrapolada antecedente à recessão na hora do pico (HEALY; COOK, 2002).

Considera-se subjetiva a extrapolação da curva de recessão (Figura 4), definida pelo declínio da descarga natural de uma dreagem na ausência de entrada através da precipitação e é assumida por leis de decaimento exponencial (DOMENICO; SCHWARTZ, 1990). Isso porque não há padronização da equação gráfica. É possível observar apenas uma tentativa de acomodar melhor a curva entre o processo de defasagem e o início da variação do nível.

O método *WTF* possibilita estimar a recarga, a partir da relação entre a capacidade específica do meio penetrado pela perfuração do poço de monitoramento, o qual atinge a zona saturada, e a variação anual da altura do nível da água. Evidencia-se que esse método apresenta melhor resultado quando os níveis de água subterrânea mostram uma resposta instantânea aos eventos de precipitação, em áreas individuais, de uma zona vadosa (= zona aerada) não saturada, relativamente estreita (HEALY; COOK, 2002).





**Figura 4 - A faixa de variação do nível ( $\Delta h$ ) é igual à diferença entre o pico da elevação e o ponto baixo da curva de recessão extrapolada antecedente (linha tracejada) na hora do pico**

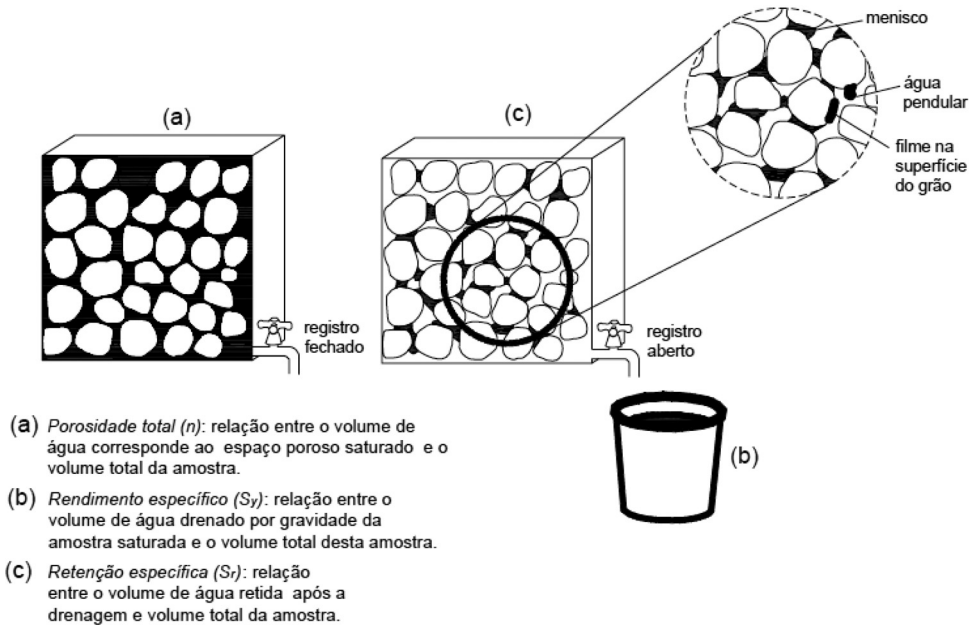
Fonte: Dambrós, 2011.

Esse método, ainda, sugere que o rendimento específico de um aquífero livre é virtualmente igual ao coeficiente de armazenamento, sendo da ordem da macroporosidade do meio. E, com base em Maziero (2005), é possível destacar que o rendimento específico traduz a quantidade de água disponível para uso humano, enquanto a retenção específica sinaliza a porção de água retida na rocha (ou reservatório) posterior à drenagem por gravidade, conforme demonstra a figura 5.

Já Millar (1988) defende que o rendimento específico é um parâmetro equivalente à macroporosidade do material. Visto nessa perspectiva, ele pode ser determinado pela diferença entre os conteúdos de água no solo, na saturação e, na capacidade de campo.

Considerando a porosidade do solo, é importante salientar que há diferentes diâmetros em função das relações texturais das partículas na fração areia (2-0,062 mm), silte (0,062-0,002 mm) e argila (<0,002 mm). Quando o diâmetro do poro for superior a 0,08 mm, diz-se que ele é um macroporo. Se o poro for menor ou igual a 0,08 mm, então ele é denominado microporo. De acordo com Brady e Weill (2002), os macroporos são, geralmente, os poros existentes entre os agregados, enquanto os microporos são poros que estão dentro dos agregados.

É importante determinar os índices de porosidade, uma vez que eles indicam a quantidade máxima de água que uma rocha ou solo pode conter quando saturado, funcionando como um reservatório. Ademais, a configuração e o tamanho dos poros do solo interferem na condutividade hidráulica. E, conforme Brady (1983), os macroporos são responsáveis pela movimentação da água no subsolo. Ainda, eles interferem no tempo de resposta da precipitação pluviométrica em relação à flutuação do nível freático. Consequentemente, os macroporos influenciam na capacidade de recarga do aquífero.



$$\text{Porosidade total } (n) = \text{rendimento específico } (S_y) + \text{retenção específica } (S_r)$$

**Figura 5 - Esquema simplificado e conceitual relativo à porosidade total, rendimento específico e retenção específica de um material sedimentar**

Fonte: Gomes (2008) modificado de (YOUNGER, 2007).

## MATERIAL E MÉTODOS

A Metodologia Quantitativa foi norteadora deste trabalho. Na geologia, ela é entendida como Hidrogeologia Quantitativa. Entende-se que a aplicação da metodologia quantitativa em estudos de bacia hidrográfica contribui para o planejamento e gestão desse recurso. Para tanto, é preciso expressar, quantitativamente, todas as características de forma, de processos e de suas inter-relações. Porém, nenhum desses índices, quando analisados isoladamente, devem ser entendidos como simplificadores da complexidade e da dinâmica de uma bacia hidrográfica. Arrares e Campos (2007) esclarecem que isso é devido à magnitude temporal que a caracteriza.

O emprego da quantificação contribui não só para ordenar informações, mas para torná-las manipuláveis e compreensíveis. Um bom exemplo desse procedimento é a aplicação de técnicas estatísticas. Dessa forma, a utilização de métodos quantitativos na linguagem científica, interdisciplinar e universal pode ser destacada por promover a precisão de um dado, além de oferecer eficientes modelos analíticos, preditivos e de planejamento, corrobora (NENTWIG SILVA, 1978).

Nesta pesquisa, utilizou-se, ainda, a abordagem sistêmica. Os primeiros estudos de bacias hidrográficas nessa perspectiva metodológica foram realizados por Robert E. Horton,

em 1940. Esse método tornou-se necessário e contribuiu para compreensão das relações entre as variáveis analisadas e para o entendimento organizacional do objeto de estudo. Sua aplicação, juntamente com a quantificação, colaborou para entender o funcionamento do sistema e o grau de complexidade da relação entre as variáveis. Assim, foi possível medir o comportamento de uma variável, bem como entender seu comportamento diante das outras variáveis integrantes de um sistema.

De forma mais dinâmica, Christofolletti (1978) apresenta a estruturação da teoria dos sistemas. Segundo este autor, a referida teoria contribui para focar mais as pesquisas e permite descrever com maior precisão o campo de estudo da ciência, assim como possibilita reconsiderações críticas de muitos conceitos científicos.

Logo, ao analisar elementos de um sistema, procura-se entender como se dá a relação de um elemento com os demais e com o sistema em sua totalidade. Em síntese, é a compreensão funcional mantenedora do sistema. Essa concepção está vinculada à metodologia quantitativa, na qual se trabalha o espaço como sistema simplificado e organizado. É um modelo que pode ser representado por meio de padrões matemáticos, estatísticos e geométricos, uma modelagem preditiva, conforme argumenta Christofolletti (1976).

A obtenção de resultados em uma pesquisa está condicionada à aplicação de técnicas. Para tanto, é necessário identificar algumas características do objeto empírico. Além disso, tornam-se indispensáveis o tratamento dos dados e a interpretação correta dos resultados obtidos.

A presente pesquisa foi desenvolvida em etapas de campo e de laboratório. As atividades de campo correspondem às coletas de amostras de solo e/ou rocha deformada(s) e não deformada(s). Quinzenalmente, determinou-se a profundidade do nível da água de cada poço. Para isso, utilizou-se o freatímetro sonoro e/ou medidor Solinst TLC, capaz de medir a temperatura da água (°C), o nível da água (m) e a condutividade elétrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). Esse procedimento buscou aferir possíveis erros registrados nos medidores automáticos. Optou-se pelo posicionamento global, com uso do *Global Position System* na boca do poço, conforme mostra a figura 3. Adotou-se o *datum* horizontal, SAD 69, e o vertical, o Porto de Imbituba/Santa Catarina.

Nas coletas de amostras de solo com estrutura deformada, fez-se, inicialmente, uma limpeza no local da coleta, retirando-se a vegetação superficial, raízes e qualquer outra matéria estranha ali presente. Posteriormente, iniciou-se o processo de coleta. Foram recolhidas amostras de calha durante a perfuração dos poços em subsuperfície. E, nos afloramentos, foi preciso utilizar pá de corte.

Como a coleta de amostras não deformadas requer mais cuidado, tais amostras foram retiradas em anéis metálicos com altura de 2 cm e área de 18,08 cm<sup>2</sup>. O processo consiste em inserir o anel no solo, para a retirada da amostra. Em seguida, retirou-se o excesso de solo, cuidadosamente, para não perder a estrutura da amostra. Após recolhidas, as amostras - deformadas e não deformadas - foram acondicionadas em sacos plásticos. Depois foram etiquetadas com informações necessárias para posterior identificação.

A etapa seguinte corresponde aos ensaios de condutividade hidráulica e granulometria. Tal processo foi realizado na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), no Laboratório de Sedimentologia do Departamento de Geociências. E os ensaios de porosidade total foram efetuados no Laboratório de Física do Solo, no Centro de Ciências Rurais (CCR) da mesma universidade.

Para a realização do método *WTF*, foi necessário: o monitoramento da flutuação do nível da água subterrânea em cada poço e a determinação da porosidade total. E, em concordância com Millar (1988), Healy e Cook (2002) e Gomes (2008), considerou-se o rendimento específico um parâmetro equivalente à macroporosidade.

As perfurações dos poços ocorreram no primeiro semestre de 2009, em conformidade com as Normas técnicas da ABNT, NBRs 12.212/2006 e 12.244/2006. Foram utilizados tubos

de plástico PVC, de diâmetro 40 mm, ranhurados transversalmente, a fim de facilitar a penetração da água subterrânea. Além disso, os poços foram protegidos com laje sanitária em concreto. Em seguida, foram numerados e pintados com tinta de cor amarela a base de epóxi, para facilitar a visualização e evitar acidentes. Lateralmente, instalou-se um cano plástico PVC ranhurado, para auxiliar as trocas de pressão interna e o ar atmosférico, como demonstra a figura 2.

Os transdutores de pressão (medidor automático *barologger* e *levelogger* da Solinst®) registram dados do nível de água em intervalos de tempo pré-determinados, os quais são transferidos por cabo óptico e programa específico a um *notebook*. Já o nível do lençol freático é determinado pela subtração dos dados de pressão do *levelogger* e do *barologger*. E o resultado deve ser subtraído do comprimento do cabo em que fica preso o *levelogger*, imerso na lâmina de água (zona saturada, em aquíferos porosos livres).

Quanto ao período de tempo observado, este estudo avaliou a sub-bacia de campo no período de setecentos e sessenta e seis (766) dias, compreendidos de 26/05/2009 a 30/06/2011. Já a sub-bacia florestada foi acompanhada por setecentos e vinte e um (721) dias, iniciando em 10/07/2009 e encerrando-se em 30/06/2011 (DAMBRÓS, 2011). Nesse período, realizaram-se expedições de campo quinzenalmente, para a coleta das informações armazenadas e a verificação das condições dos registradores.

Em relação à porosidade total, à macroporosidade e à microporosidade do solo, estas foram determinadas no Laboratório de Física do Solo – no CCR/UFSM. E tal processo foi realizado em coluna de areia, seguindo a metodologia descrita por (REINERT e REICHERT, 2006).

As amostras de solo com estrutura não deformada foram saturadas durante vinte e quatro horas. Em seguida, determinou-se a massa saturada. Posteriormente, as amostras foram levadas à coluna de areia, aplicando-se uma tensão de 6 kPa, até atingir-se o equilíbrio, entre a água retida da amostra e a tensão aplicada. Nessa tensão, o conteúdo de água retirada da amostra representa a macroporosidade do solo, e o volume de água retido representa a microporosidade, de acordo com (OLIVEIRA, 1968). A seguir, determinou-se a microporosidade, a qual foi obtida pelo conteúdo de água retida na amostra, submetida a uma mesa de tensão, com uma tensão de 6 kPa, multiplicada pela densidade do solo.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

O monitoramento dos poços e os trabalhos de campo possibilitaram a aproximação com a realidade das águas subterrâneas nas sub-bacias hidrográficas. E as duas áreas em estudo se caracterizam por serem de distinto uso do solo. Isso levou a resultados que se relacionam com os dados de recarga, por meio da aplicação do método *WTF*, de análises físicas de solo (granulometria e porosidade) e de análise da flutuação do nível do lençol freático.

Quanto às discussões sobre esta temática no âmbito científico, é possível reconhecer que a aplicação do método *WTF* no Brasil se intensificou a partir do começo do século XXI. Isso influenciou a aplicação deste método nas sub-bacias hidrográficas representativas. Cabe ressaltar, ainda, que os estudos sobre a recarga das águas subterrâneas são de extrema importância para os processos de gestão e uso deste recurso natural, renovável (Ciclo Hidrológico), seguindo-se os preceitos da sustentabilidade.

Entretanto, a determinação da recarga e a realização das análises de modo sistemático exigem a aplicação de algumas técnicas laboratoriais, as quais possibilitaram compreender melhor os resultados da pesquisa. Nesse sentido, optou-se por realizar a primeira

análise e a apresentação dos resultados de forma individualizada e, posteriormente, apresentar a discussão com todos os componentes formadores dos resultados da pesquisa.

Uma vez que a relação entre as aberturas (vazios) e o volume total de um solo ou rocha é referida como sua porosidade, Heath (1983) selecionou alguns materiais. O autor estimou cerca de 55% para as aberturas primárias em um solo, enquanto que, em areia, aproximadamente 25%. Ainda considerou um arenito semiconsolidado constituído por 10% de aberturas primárias. Os valores de porosidade total encontrados na pesquisa são apresentados na tabela 1 e estão em conformidade com outros resultados publicados na literatura.

A tabela 1 apresenta os valores encontrados na pesquisa. E cabe mencionar que a macroporosidade obtida para cada amostra foi considerada equivalente ao rendimento específico do meio.

O valor médio de rendimento específico mais elevado na rocha sedimentar porosa do que em ambos os solos avaliados pode relacionar-se a uma maior homogeneidade da sua matriz, constituída pela fração areia fina. Quanto à retenção específica elevada, deve-se associar à ocorrência de microporos (frações de silte + argila) nas amostras de solo.

É necessário frisar que a determinação do rendimento específico ( $S_y$ ) é imprescindível. Ele representa uma das variáveis necessárias para a determinação da recarga do aquífero livre, utilizadas pelo método *WTF* (Equação 1).

A análise da flutuação do nível da água subterrânea foi realizada no período 2009-2011. Com o uso de medidores automáticos, foi possível obter informações do nível da água subterrânea em intervalos diários de 60 minutos, durante um período 766 dias, na sub-bacia de campo. Já a sub-bacia florestada registrou o período de 721 dias. Devido ao grande volume de dados, foi preciso sistematizá-los em valores médios, em intervalos de tempo de 24 horas, facilitando a sua leitura e interpretação.

**Tabela 1 - Sistematização das informações de porosidade total em porcentagem e determinação do rendimento específico e retenção específica**

Amostras		Porosidade total (%)	Macroporosidade (%)	Rendimento específico – $S_y$ (%)	Retenção específica $S_r$ (%)	$S_y$ médio (%)
Campo/rocha	1	39,90	20,95	20,95	18,95	21,12
	2	43,40	21,29	21,29	22,11	
Campo/solo	1	46,30	17,31	17,31	28,99	16,87
	2	45,30	16,44	16,44	28,86	
Floresta/solo	1	50,50	16,83	16,83	33,67	13,75
	2	38,90	10,66	10,66	28,24	

Em todos os poços de monitoramento, é visível a relação entre a variação do nível com os eventos de precipitação. Ilustram-se nesse artigo as flutuações que ocorreram nos dias 160 e 270, quando eventos de precipitações elevadas. Tal período corresponde aos meses de novembro e dezembro de 2009 e de janeiro e fevereiro de 2010, quando ocorreram eventos extremos de precipitação pluviométrica, registrados pelas estações automáticas da Agência Nacional de Águas/ANA. Por exemplo, no dia 162, constatou-se aproximadamente 269 mm de precipitação (DAMBRÓS, 2011; SILVÉRIO DA SILVA; DAMBRÓS, 2012 e DAMBRÓS; SILVÉRIO DA SILVA, 2013).

Em relação a este caso extremo de precipitação, à flutuação do nível da água nos poços, o poço P1 apresentou uma variação total de 2,61 m. O poço P4 ofereceu uma faixa de flutuação do nível de 1,80 m. Sua posição na paisagem é junto à APP e ele pertence à Planície Aluvial, próximo ao curso de água permanente. O poço P4 apresentou, ainda, seu nível mais próximo à superfície do terreno, com uma assinatura bastante marcada, a cada evento de precipitação pluviométrica.

Diferentemente dos demais poços, o poço P3, localizado na interface da área florestada com a APP, registrou uma assinatura mais suave nas suas respostas aos eventos de precipitação. Essa condição refletiu-se na faixa de flutuação, a qual foi de 1,36 m.

Os poços P2 (figura 3) e P5 localizam-se dentro da floresta de eucaliptos. O Poço 5 apresentou, nos eventos de maior precipitação, movimentos abruptos do nível da água subterrânea e, nos períodos entre esses eventos, o nível da água teve variações mínimas. Sua faixa de variação do nível foi da magnitude de 2,5 m.

Já o Poço P2 exibiu uma assinatura diferenciada quando comparado aos demais poços da sub-bacia florestada. Ele se encontra em posição mais elevada na paisagem (cota 155m), mais distante em relação ao vertedouro instalado. Apresentou uma faixa de flutuação do nível de cerca de 4,52 m.

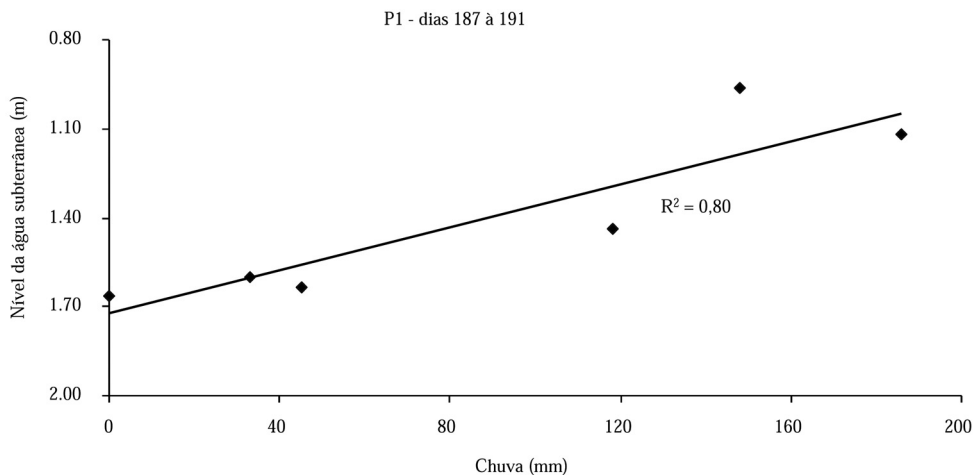
Buscando-se uma possível explicação para a diferença nos valores encontrados entre os poços (P2 4,52m contra P4 1,80 m), recorreu-se às estimativas de Ávila (2011). Com isso, constatou-se um valor significativamente menor de umidade do solo, possivelmente atribuído ao processo de evapotranspiração dos eucaliptos, cujo efeito tenderia a diminuir a quantidade de água na porção insaturada do solo. Também Gouvêa (2009) confirma que a evapotranspiração tem maior influência do que a porosidade na variação do nível da água. Ainda, Ávila (2011) constatou que a área florestada, apresentou uma menor porcentagem de umidade inicial no solo, em relação às áreas de campo. Como esta pesquisa foi realizada nas mesmas áreas do presente estudo, são trabalhos que se complementam.

A figura 6 ilustra a correlação determinada pela regressão linear obtida entre o nível da água subterrânea e a precipitação. Verificou-se que há alta correlação linear entre estas duas variáveis no período. Assim, elegeu-se um evento para tal verificação, entre os dias 187 e 191, utilizando-se os dados referentes ao poço P1 da sub-bacia de campo, conforme mostra a figura 6.

Em seguida, a correlação foi testada em outros eventos que também apresentaram muita semelhança. Desse modo, pode-se afirmar que, no evento, pelo menos 80% da variação do nível da água subterrânea corresponde à ocorrência da precipitação no período de tempo analisado.

Portanto, constatou-se que a flutuação do nível da água subterrânea nos poços de monitoramento apresentou correlação com a precipitação pluviométrica em uma série de longa duração de 731 dias. Isso indica a existência de outros fatores que podem influenciar na flutuação do nível da água subterrânea, uma vez que a precipitação pluviométrica foi a principal responsável pela flutuação do nível da água subterrânea. Sendo assim, foram validadas as premissas do método *WTF* na estimativa da recarga, a partir dos eventos de precipitação pluviométrica na interface solos e o aquífero livre, intergranular, constituído pelos materiais sedimentares da Formação Pirambóia, na (ZA) do SAG.

A aplicação do método *WTF* na estimativa da recarga subterrânea, considerando-se a equação 1, requer a determinação de dados sobre o rendimento específico de cada poço. Isso é apurado a partir das informações do ensaio de porosidade total. Na equação, o ( $\Delta t$ ) representa o período de tempo em que se realizou o monitoramento, totalizando 721 dias. E o ( $\Delta h$ ) é a diferença entre os picos de elevação do nível e o ponto baixo da curva de recessão extrapolada antecedente na hora do pico.



**Figura 6 - Comportamento da regressão linear entre o nível da água subterrânea e a precipitação no período de monitoramento compreendido dos dias 187 a 191, no poço P1, e determinação de sua correlação ( $R^2$ ), ou seja, variação de 0,60 metros em 4 dias com cerca de 200 milímetros de precipitação**

Buscando-se realizar estimativas de recarga, no mesmo período, em todos os poços de monitoramento, realizou-se a supressão de um pequeno período avaliado no poço P1. Por isso, para determinar o ( $\Delta h$ ), foram consideradas as recessões mais significativas (em torno de 0,25 m). Em seguida, estabeleceu-se uma curva de tendência exponencial para posterior extrapolação da curva de recessão. A partir disso, foi possível encontrar a diferença de altura do nível da água subterrânea com o pico de flutuação. Para o poço P1, foram identificadas 11 recessões significativas. Somando essas diferenças de altura ( $h$ ), determinou-se o ( $\Delta h$ ) do período. Esse mesmo procedimento, também foi realizado nos demais poços.

O ( $S_y$ ) foi apurado a partir dos dados de porosidade total, obtidos em ensaio de laboratório. Destaca-se que o ( $S_y$ ) das amostras de solo/rocha sedimentar são representativas da zona vadosa (saturada). Na sub-bacia hidrográfica de campo foi de 16,87% enquanto na sub-bacia hidrográfica florestada foi 13,75%, conforme ilustra a tabela 1. E torna-se pertinente salientar, que resultados semelhantes foram alcançados por Ávila (2011), na mesma área de estudo, utilizando o método do infiltrômetro em várias posições na paisagem, próximo aos poços de monitoramento.

A tabela 2 revela os valores encontrados na determinação da recarga subterrânea, com o método *WTF* (Equação 1), para o período de monitoramento de aproximadamente dois anos hidrológicos (2009/2011).

Esta pesquisa utilizou os dados médios de precipitação ocorridos no Estado do Rio Grande do Sul, apresentados por Sotério et al. (2005) que consideraram o período de 1976 a 2002, para a região em estudo estimaram um valor médio anual de 1.590,8 mm de chuva. Esta inserida na sub-bacia 76 (Rio Uruguai, Ibicuí e outros) SEMA (2004). Obteve-se como resultado estimado a recarga de 4,71% de precipitação total anual para a sub-bacia de campo, enquanto que para a sub-bacia florestada, o percentual estimado foi de cerca de 5,65%.

**Tabela 2 - Sistematização das informações referentes à estimativa de recarga para cada poço de monitoramento**

Sub-bacia	Poços	$\Delta H$ (m)	$\Delta t$ *** (período)	$S_y$	WTF – recarga (m/período)	WTF – recarga (mm/período)
Campo	P1*	7,43	721	16,87	0,17	170
Florestada	P2**	8,04	721	13,75	0,15	150
	P3**	3,54	721	13,75	0,06	60
	P4**	11,82	721	13,75	0,22	220
	P5**	7,47	721	13,75	0,14	240

Dh = somatório das diferenças altimétricas das curvas extrapoladas.

$S_y$  = rendimento específico

\* Sub-bacia hidrográfica de campo.

\*\* Sub-bacia hidrográfica florestada.

\*\*\* O período de monitoramento é composto por 721 dias.

O fato de a sub-bacia hidrográfica de campo, apresentar apenas um poço de monitoramento instalado, possibilitou obter-se uma informação em escala pontual sobre a recarga do aquífero livre, o qual se encontra presente na sub-bacia hidrográfica. Já, na sub-bacia florestada, os quatro poços alinhados em uma mesma vertente permitiram realizar uma estimativa de recarga média para esta vertente. Informa-se que durante o ano de 2012, foram perfurados mais quatro poços de monitoramento, sendo dois em cada uma das áreas estudadas.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Observando o comportamento do nível da água subterrânea nos poços monitorados, constatou-se que a flutuação do nível da água subterrânea ocorreu nas duas sub-bacias. E a flutuação total variou de 1,36 m a 4,52 m, no período estudado (2009/2011), correspondente a dois anos hidrológicos.

O método *WTF*, utilizado para a estimativa de recarga da água subterrânea em solo/rocha sedimentar em aquífero poroso, intergranular livre, pertencente a (ZA) do SAG, demonstrou ser de fácil aplicabilidade.

Na aplicação do método, obteve-se uma estimativa de recarga da água subterrânea de 170 mm na sub-bacia hidrográfica de campo. Já na sub-bacia hidrográfica florestada revelou-se uma faixa de variação entre 60 até 220 mm. Isso representa valores da ordem de 4,71% e 5,65% da precipitação média anual, considerando-se as duas sub-bacias apresentando diferentes manejos dos solos superficiais (campo nativo x florestada).

Em comparação com pesquisas de estimativas de recarga subterrâneas já realizadas em outras zonas de afloramentos do SAG, considerou-se que os resultados desta pesquisa foram satisfatórios. Também se confirma que a estimativa de recarga de aquíferos livres pelo método *WTF* apresenta confiabilidade, pois as implicações confirmadas nesta pesquisa vão ao encontro da literatura.

Portanto, os avanços obtidos em relação à série histórica de registros de níveis de água subterrânea possibilitaram estimativas de recarga, assim como permitiram compreen-



der melhor as interações do Ciclo Hidrológico, contribuindo com os métodos da Ciência Geográfica (Geomorfologia, Pedologia, Climatologia, Hidrogeologia) e na formação de recursos humanos.

## AGRADECIMENTOS

À FINEP (ASUB/UFCG/UFAL/UFSM) ao CNPq/CT Hidro, pela ajuda financeira e bolsa de estudos de mestrado. Aos proprietários das terras onde estão instalados os poços de monitoramento e registradores pela facilidade de acesso.

## REFERÊNCIAS

ARRAES, T. M.; CAMPOS, J.E.G. Proposição de critérios para avaliação e delimitação de bacias hidrogeológicas. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 37, p. 81-89, 2007.

ASUB/UFCG/UFAL/UFSM. Integração dos Instrumentos de Outorga, Enquadramento e Cobrança para a Gestão das Águas Subterrâneas. **Relatório Parcial de Execução II**: Campina Grande/PB, outubro 2012. Disponível em: <http://www.hidro.ufcg.edu.br/asub/>.

ÁVILA, C. B. **Estudo da capacidade de infiltração em um solo da unidade de mapeamento Santa Maria, submetido a três diferentes usos e cobertura do solo**. Trabalho de Graduação (Engenharia Florestal), UFSM, 2011.

BARRETO, C. E. A. G. **Balanço hídrico em zona de afloramento do Sistema Aquífero Guarani a partir de monitoramento hidrogeológico em bacia representativa**. 2006. 271 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2006.

BARRETO, C. E. A. G.; GOMES, L. H.; WENDLAND, E. C.; PAIVA, J. B. D. de. Balanço hídrico em zona de afloramento do Sistema Aquífero Guarani a partir de monitoramento hidrogeológico em bacia representativa. In: AMORE, L.; SANTA CRUZ, J. N.; MANGANELLI, A.; MONTES, R. (Org.). **Aquífero Guarani** - Avanços no conhecimento para sua gestão sustentável. 1 ed. Montevideo: ALHSUD, 2007, v. 1, p. 139-155.

BAUMHARDT, E.; De PAULA, S.C.; MAZIERO, E.; CRUZ, J.C.; SILVÉRIO DA SILVA, J.L. O uso do *Water Table Fluctuation-WTF*, como estimativa de recarga direta em microbacias sob diferentes usos do solo. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 6, João Pessoa, 2012. **Anais....** João Pessoa: ABRH, 2012, p.17.

BRADY, N. C. **Natureza e propriedades do solo**. 6 ed. Rio de Janeiro: Freitas, 1983.

BRASIL/CPRM, 2008. Disponível em: < <http://www.cprm.gov.br>>. Acesso: 10 maio 2010.

BRASIL. ABNT/NBR 12.212. Poço tubular – Projeto de poço tubular para captação de água subterrânea. 2006. 7p.

BRASIL. ABNT/NBR 12.244. Poço tubular – Construção de poço tubular para captação de água subterrânea. 2006.

CAETANO-CHANG, M.R.. **A Formação Pirambóia no centro-leste do Estado de São Paulo**. Tese (Livre Docência), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Rio Claro/SP, 1997. 196 p.

- CARNIER NETO, D. **Monitoramento de nível d'água em poços no Aquífero Rio Claro**. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) – UNESP – Rio Claro, Rio Claro/SP. 2006.
- CHRISTOFOLETTI, A. As características da nova geografia. **Geografia**. v. 1, n. 1, abr. de 1976.
- CHRISTOFOLETTI, A. Densidade de Rios e de Segmentos. **Notícia Geomorfológica**, Campinas, v. 18, n. 35, p. 124-128, 1978.
- CPRM- Serviço Geológico do Brasil. Mapa geológico do Estado do Rio Grande do Sul. Disponível em: [http://www.cprm.gov.br/publique/media/mapa\\_rio\\_grande\\_sul.pdf](http://www.cprm.gov.br/publique/media/mapa_rio_grande_sul.pdf). Acesso em: 10/05/2013.
- DAMBRÓS, C. **Recarga e flutuação do nível da água subterrânea em sub-bacias com floresta e campo nativo**. Dissertação (Mestrado) PPGE, UFSM, Santa Maria, Brasil, 2011, p.119.
- DAMBRÓS, C.; SILVÉRIO DA SILVA, J. L. Comportamento do nível da água subterrânea em sub-bacia representativa em área de afloramento do Sistema Aquífero Guarani. In: WORLD WATER CONGRESS, 14, Recife, 2011. **Anais...** Recife: IWRA, 2011.
- DAMBRÓS, C.; SILVÉRIO DA SILVA, J. L. Recarga e flutuação do nível da água subterrânea em sub-bacias com floresta e campo nativo. XI CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDROGEOLOGÍA. Colômbia, **Anais**, CD-Rom, agosto. 2012, 5p.
- DAMBRÓS, C.; SILVÉRIO DA SILVA, J. L. Aplicação do Método WTF para determinação de estimativas de recarga de aquífero: Comparação Entre Duas Sub-Bacias Hidrográficas. **Anais... XX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS**, Bento Gonçalves, 2013, CD-ROM, p.8.
- DESCOVI FILHO, L.L.V. **Subsídios para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.
- DOMENICO, P.A.; SCHWARTZ, F.W. **Physical and chemical hydrogeology**. New York: John Wiley and Sons, 1997.
- GOMES. L. H. **Determinação da recarga profunda na bacia-piloto do Ribeirão da Onça em zona de afloramento do Sistema Aquífero Guarani a partir do balanço hídrico em zona saturada**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos: USP, São Carlos. 2008.
- GOUVÊA, T. H. **Análise estatística da influência da precipitação e de características do solo na variação do nível d'água em área de recarga do Aquífero Guarani**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Eng. de São Carlos: USP, São Carlos. 2009.
- HEALY, R.W.; COOK, P.G. Using groundwater levels to estimate recharge. **Hydrogeology Journal**. v. 10, n. 1, p. 91-109, 2002.
- HEATH, R. C. **Hidrologia básica de água subterrânea**. United States: Geological Survey Water-Supply Paper. Traduzido Mario Wrege; Paul Potter, IPH/UFRGS. Porto Alegre. 1983.
- FARIAS, P.V. da **Flutuação dos níveis de água subterrânea em microbacias do Rio Vacacaí-Mirim, RS, Brasil**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Amb.) PPGE, 2011, 83f.
- LUCAS, M.C.; GUANABARA, R.C.; WENDLAND, E. Estimativa de recarga subterrânea em área de afloramento do Sistema Aquífero Guarani. **Boletín Geológico y Minero**, v. 123, n. 3, p. 311-323, 2012.
- MACHADO, J.L.F.; FREITAS, M.A. **Projeto Mapa hidrogeológico do Estado do RS**. CPRM/SEMA/DRH. Relatório Final. P.82, ilustr. + mapa na Escala de 1:750.000. 2005.

MARTELLI, G. V. **Monitoramento da flutuação dos níveis de água em aquíferos freáticos para avaliação do potencial de recarga em área de afloramento do Sistema Aquífero Guarani em Cacequi – RS.** Dissertação (Mestrado) PPGEC, UFSM, Santa Maria, Brasil, 2012, 151f.

MAZIERO, T. A. **Monitoramento de água subterrânea em área urbana:** aspectos quantitativos. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, 2005.

MILLAR, A. A. **Drenagem de terras agrícolas:** bases agrônômicas. São Paulo:Editerra. 1988.

MONTAÑO, J.; CARRIÓN, R. Optimización de la explotación del sistema Acuífero Jurásico Triásico, Tacuarembó - Buena Vista, In: CONGRESO BRASILEÑO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS, 6, Porto Alegre, 1990. **Anais....** Porto Alegre, 1990, p. 180-189.

NENTWIG SILVA, B. Métodos quantitativos aplicados em geografia: uma introdução. **Geografia.** Rio Claro, v. 3, n. 6, p. 33-73, 1978.

ORGANIZATION OF AMERICAN STATES/OAS/SAP. **Guarani Aquífer:** Strategic Action Program = Acuífero Guarani: programa estratégico de acción – Bilingual edition- Brazil, Argentina, Paraguay, Uruguay: Organization of American States (OAS). January, 2009, 224p.

OLIVEIRA, L. B. Determinação da macro e microporosidade pela “mesa de tensão” em amostras de solo com estrutura indeformada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira,** Brasília, v. 3, p. 197-200, 1968.

PACHECO, F. **Estudio Hidrogeológico Del Sistema Acuífero Guarani en la zona Rivera-Sant’Ana do Livramento.** Trabajo personal. Fondo de universidades/PSAG, 2004. p. 1-95.

PAIVA, G. P de. **Estimativa de recarga em uma unidade detrítica de uma micro-bacia do Rio Piranga (MG).** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa/MG, 2006.

PAULA E SILVA, F.; KIANG, C. H.; CAETANO-CHANG, M.R.; SINELLI, O.. Arcabouço geológico e hidrofacies do Sistema Aquífero Guarani, no município de Ribeirão Preto (SP). **Revista Brasileira de Geociências,** v. 38, n. 1, São Paulo, p. 56-67, 2008.

PAULA SOARES, A.; SOARES, P. C.; HOLZ, M. Correlações Estratigráficas Conflitantes no Limite Permo-Triássico no Sul da Bacia do Paraná: O Contato Entre Duas Sequências e Implicações na Configuração Espacial do Aquífero Guarani. **Revista Pesquisas em Geociências,** v. 35, n. 2, p. 115-133, 2008.

PÉREZ, A., ROCHA, L. Aportes al conocimiento del Acuífero Guarani. Area Ciudad de Rivera-Uruguay. In: BOCANEGRA, E.; MARTINEZ, D.; MASSONE, H. (Ed.). **Groundwater and Human Development,** ALN SUD, 2002, p. 598-605.

PSAG. <<http://www.sg3guarani.org/Fundo das Universidades>. Texto completo (151p.,2v.) e Resumo executivo Português, Espanhol e Inglês. 2006.

REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Coluna de areia para medir a retenção de água no solo – protótipos e teste. **Ciência Rural,** Santa Maria, v. 36, n. 6, p. 1931-1935, nov./dez., 2006.

RIO GRANDE DO SUL. Secretaria do Meio Ambiente/SEMA, 2004. 25 Bacias hidrográficas. Disponível em: <http://www.sema.rs.gov.br/>. Acesso em: 23 de abril de 2010.

SARTORI, M. G. **O Clima de Santa Maria:** do regional ao urbano. Dissertação (Mestrado em Geografia) Universidade de São Paulo. São Paulo, 1979.

SARTORI, P. L. P.; SILVÉRIO DA SILVA, J. L.; KAWASHITA, K. Idades radiométricas K-Ar e indicações sobre a área fonte das micas dos arenitos fluviais da Formação Sanga do Cabral. In: SIMPÓSIO SOBRE CRONOESTRATIGRAFIA DA BACIA DO PARANÁ, 2, Porto Alegre, 1995. **Anais...** Porto Alegre: UFRGS, 1995, p. 111-113.

SCANLON, B. R.; HEALY, R. W.; COOK, P. G. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. **Hydrogeology Journal**, v. 10, n. 1, 2002.

SILVÉRIO DA SILVA, J. L.; PEDRON, F.A.; DESCOVI, L.V.D.F.; WERLANG, M.K.; CABRAL, D.R. 2010. Características morfológicas do Membro Alemoa, Formação Santa Maria, RS. **Anais...** In: VIII Reunião sul-brasileira de ciência do solo. Santa Maria, RS. 6p.

SILVA BUSSO, A.A. Geologic and Hydrogeologic aspects of the thermal aquifer system in Argentinean eastern Chacoparanense Basin. In: JOINT WORLD CONGRESS ON GROUNDWATER, 1, Fortaleza, 1999. **Anais...**, 1999.

SILVÉRIO DA SILVA, J.L.; DESCOVI FILHO, L. V.; BAUMHARDT, E.; CRUZ, J.C.; SOUZA, A.; S; MAZIERO, E. Avaliação preliminar da flutuação do nível freático em microbacias representativas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 18, Campo Grande, 2009. **Anais...** Campo Grande, 2009.

SILVÉRIO DA SILVA, J.L.; FARIAS, P.V.C. Estimativa de Recarga de Água Subterrânea em Microbacia Hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim/RS. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 20, Bento Gonçalves, 2013. **Anais...** Bento Gonçalves, 2013, CDROM, p. 8.

SUERTEGARAY, D. M. A.; GUASSELLI, L. A. Paisagens (Imagens e Representações) do Rio Grande do Sul. In: VERDUM, R.; BASSO, L. A.; SUERTEGARAY, D. M. A. **Rio Grande do Sul – paisagens e territórios em transformação**. 1ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2004, 27-38 p.

WAHNFRIED, I; HIRATA, R. Comparação de métodos de estimativa de recarga de aquíferos em uma planície aluvionar na Bacia Hidrográfica do Alto Tietê (São Paulo). **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. V. 10. N. 2, Abr/Jun. 2005, p 15 – 25.

WENDLAND, E.; BARRETO, C.; GOMES, L.H. 2007. Water balance in the Guarani Aquifer outcrop zone based on hydrogeologic monitoring. **Journal of Hydrology**, 342 (3-4), 261-269.

WENDLAND, E. and RABELO, J.L. 2009. Assessment of groundwater recharge and water fluxes of the Guarani Aquifer System, Brazil. **Hydrogeology Journal**, 17 (7), 1733-1748.

XU, Y.; BEEKMAN, H.E. Groundwater recharge estimation in Southern Africa. **UNESCO IHP**, Series n°. 64, UNESCO: Paris. ISBN 92-9220-000-3, 2003. Disponível em: <http://www.hidro.ufcg.edu.br/asub/>. Visitado em 12/06/2013.

Recebido em outubro de 2012

Revisado em agosto de 2013

Revisado em dezembro de 2013

Aceito em janeiro de 2014