

## IX-107 – ESTIMATIVA DE RECARGA AQUIFERA EM UMA BACIA DO SISTEMA AQUIFERO SERRA GERAL UTILIZANDO O MODELO SMAP

**Taison Anderson Bortolin<sup>(1,2)</sup>**

Graduado em Engenharia Ambiental pela Universidade de Caxias do Sul. Mestre e Doutorando em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. IPH/UFRGS. Instituto de Saneamento Ambiental - ISAM/UCS. tabortol@ucs.br

**Marco Antônio Presotto<sup>(1)</sup>**

Estudante de Engenharia Civil pela Universidade de Caxias do Sul. Monitor de Pesquisa no Instituto de Saneamento Ambiental – ISAM/UCS. mapresotto@ucs.br

**Pedro Antonio Roeh Reginato<sup>(2)</sup>**

Bacharel em Geologia pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, mestrado em Geociências pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul e doutorado em Engenharia pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (2003). Atualmente é professor do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da UFRGS, atuando na área de hidrogeologia. pedro.reginato@ufrgs.br

**Vania Elisabete Schneider<sup>(1)</sup>**

Graduada em Licenciatura Plena e Bacharelado em Biologia pela Universidade de Caxias do Sul; Especialista em Metodologia da Pesquisa e do Ensino Superior - Área de Concentração: Educação Ambiental; Mestre em Engenharia Civil - Área de Concentração - Recursos Hídricos e Saneamento pela Universidade Estadual de Campinas; Doutora em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Saneamento Ambiental – ISAM/UCS. veschnei@ucs.br

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Rua Francisco Getúlio Vargas, 1130 - Bloco V, sala 206. Caxias do Sul – RS. CEP: 95070-567 – Brasil – Tel (54) 32182507 – e-mail: tabortol@ucs.br

**Endereço<sup>(2)</sup>:** Av. Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre- RS. CEP: 91501970– Brasil –Telefone: (51) 33086416 e-mail: pedro.reginato@ufrgs.br

### RESUMO

Este trabalho tem como objetivo apresentar uma estimativa de recarga aquífera em uma bacia hidrográfica localizada no estado do Rio Grande do Sul utilizando o modelo hidrológico chuva-vazão SMAP (Soil Mixture Accounting Procedure). Para tal foi realizada a determinação dos parâmetros do solo e análise dos dados pluviométricos, fluviométricos e de evapotranspiração da região de estudo para calibração e validação do modelo hidrológico. O modelo utilizado apresentou resultados satisfatórios que podem ser confirmados por meio do coeficiente de eficiência Nash-Sutcliffe, o qual resultou em um valor de 0,77, considerado aceitável para calibrar o modelo hidrológico. A recarga aquífera média obtida pelo modelo hidrológico SMAP correspondeu a 19,6% da precipitação total do período analisado e a 68% da precipitação efetiva.

**PALAVRAS-CHAVE:** Hidrologia, Modelos Hidrológicos, Recarga Aquífera, SMAP.

### INTRODUÇÃO

A necessidade por água subterrânea tem aumentado de uma forma cada vez mais expressiva nos últimos anos tanto no Brasil, quanto em outras partes do mundo, evidenciando assim a necessidade da gestão adequada destes recursos hídricos, visto que os mesmos têm apresentado um importante papel no abastecimento da população, e possuem um papel ecológico fundamental, onde auxiliam na conservação da fauna e da flora. Diante disso, entende-se que quantificar a recarga das águas subterrâneas e compreender o balanço hídrico de determinado local se faz necessário, uma vez que estes dados podem auxiliar no gerenciamento dos recursos hídricos.

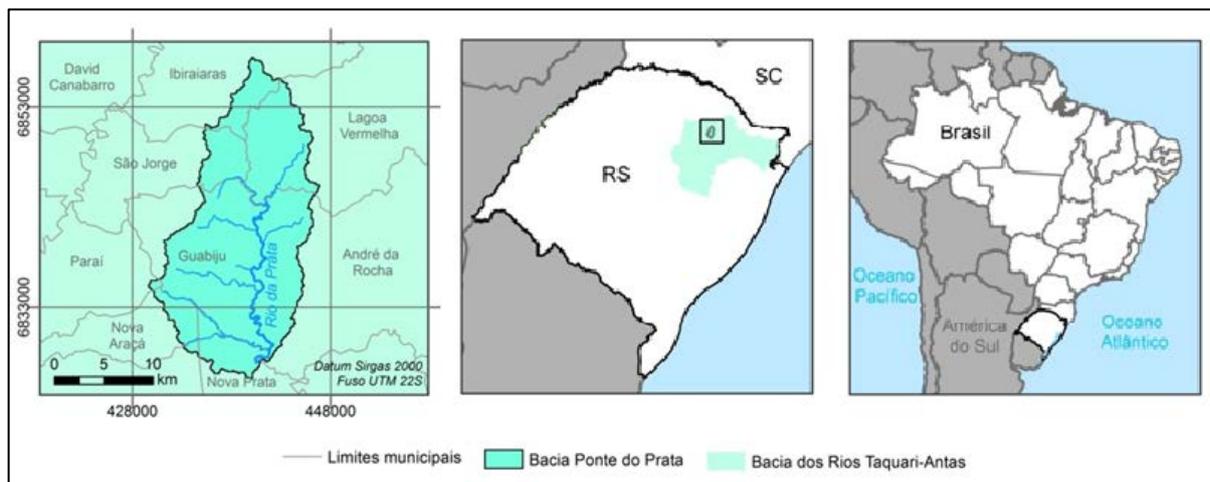
A recarga subterrânea é considerada como a quantidade de água que contribui para aumentar a reserva subterrânea permanente ou temporária de um aquífero (Lerner et al., 1990). De acordo com Lerner et al. (1990) e Oliveira (2004) a recarga aquífera está associada a três processos: direto, indireto e localizado. No processo direto a recarga que ocorre no aquífero é relacionada a água proveniente da precipitação; no processo indireto, esta recarga é associada a água percolada pelos leitos dos mananciais; e no processo localizado a recarga do aquífero é ocasionada pela contribuição de rios influentes.

A sua estimativa é essencial em estudos de disponibilidade, modelagem e proteção de sistemas aquíferos auxiliando a gestão dos recursos hídricos na forma de subsídio à tomada de decisões visando ao uso sustentável destes, minimizando a superexploração e contaminação (Lerner et al., 1990; Scanlon et al., 2002). Dessa forma, o uso de algum modelo hidrológico que auxilie na estimativa de recarga aquífera é importante. Para Bayer et al. (2012), a modelagem hidrológica se trata de uma ferramenta muito importante para antecipar o comportamento do ciclo hidrológico. Sendo assim, este trabalho objetiva estimar a recarga aquífera de uma bacia hidrográfica por meio de um modelo hidrológico conhecido como SMAP, que calcula a vazão em função da precipitação em uma bacia hidrográfica localizada no sistema aquífero Serra Geral, no estado do Rio Grande do Sul.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### ÁREA DE ESTUDO

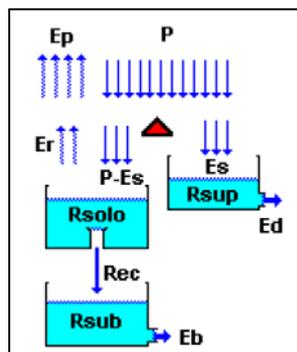
A área de estudo compreende uma sub-bacia localizada no estado do Rio Grande do Sul, tendo como exutório o posto fluviométrico Ponte do Prata, e área de drenagem total de 317 km<sup>2</sup>. Esta sub-bacia pertence a bacia hidrográfica Taquari-Antas, conforme apresentado na figura 1, e está inserida no Sistema Aquífero Serra Geral (SASG), caracterizado por possuir aquíferos com baixa a média possibilidade de se obter águas subterrâneas, condicionado pelo sistema geológico de rochas vulcânicas fraturadas.



**Figura 1 – Localização da área de estudo**

## METODOLOGIA

O SMAP (Soil Moisture Accounting Procedure) é um modelo determinístico de simulação hidrológica do tipo chuva-vazão que realiza o balanço da umidade do solo baseado em dois reservatórios lineares, um representando o solo na camada superior e o outro o aquífero (LOPES et al. 1982), conforme mostra a Figura 2.



**Figura 2 – Estrutura do modelo SMAP diário**

Fonte: Lopes et al. (1982)

Para o uso deste modelo, inicialmente se fez necessária a obtenção dos dados diários de precipitação média, chuva e evapotranspiração potencial da bacia analisada. Tais dados puderam ser obtidos no Sistema de informações Hidrológicas da Agência Nacional de Águas - ANA e no banco de dados meteorológicos para Ensino e Pesquisa – BDMEP/INMET. Para determinação da precipitação média ocorrida foram utilizados dados de três postos pluviométricos próximos a bacia ou inseridos na mesma, sendo adotado o método do inverso do quadrado da distância como forma de se obter o valor médio de precipitação. Na sequência, é iniciada a calibração do mesmo, a partir de períodos longos e sem falhas, que pode ser realizada utilizando as variáveis de entrada: vazão observada, precipitação média ocorrida e evapotranspiração potencial. Para análise, o modelo utiliza uma estrutura de três reservatórios: um superficial (Rsup), um do solo (Rsolo) e o subterrâneo (Rsub). O armazenamento superficial (Rsup) pode ser matematicamente escrito por:

$$\frac{dR_{sup}}{dt} = Es - E \text{equação (1)}$$

$$Es = 0 \text{ se } P \leq A \text{equação (2)}$$

$$Es = \frac{(P-AI)^2}{P-AI-S} \text{ se } P > A \text{equação (3)}$$

$$Ed = R_{sup} (1 - K_2), \text{ onde } K_2 = 0,5^{1/K_2t} \text{equação (4)}$$

Onde  $Es$  representa o escoamento superficial direto, obtido pelo método do *Soil Conservation Service* (SCS),  $Ed$  a vazão de depleção do escoamento superficial direto,  $P$  a precipitação,  $AI$ : abstração inicial para o método do SCS,  $S$  a abstração potencial, também para o método do SCS.  $Ed$  é definido como função do nível do reservatório superficial ( $R_{sup}$ ) e  $K_2t$  o coeficiente de depleção do reservatório superficial, como definido em Lopes (1982). Todas as unidades são em mm, exceto por  $dt$  e  $K_2t$ , que possuem dimensão de tempo (dia). O reservatório da camada superior do solo ( $R_{solo}$ ) pode ser matematicamente escrito como:

$$\frac{dR_{solo}}{dt} = P - Es - Er - Rec \text{equação (5)}$$

$$Es = Ep \text{ se } IN > E \text{equação (6)}$$

$$Es = IN + (Ep - IN)Ti \text{ se } IN \leq E \text{equação (7)}$$

$$Rec = 0 \text{ se } R_{solo} \leq R_{soloM} \text{equação (8)}$$

$$Rec = Crec \times TU \times (R_{solo} - R_{soloM}) \text{ se } R_{solo} > R_{soloM} \text{equação (9)}$$

$$TU = \frac{R_{solo}}{STR} \text{equação (10)}$$

$$IN = P - E \text{equação (11)}$$

Onde  $P$  e  $Es$  conforme definidos acima,  $Er$  é a taxa de evapotranspiração,  $Rec$  é a recarga do reservatório do subsolo,  $Crec$  o coeficiente de recarga do reservatório do subsolo,  $IN$  é definido como a diferença entre  $P$  e  $Es$  e é a parcela da precipitação que infiltra,  $TU$  o teor de umidade do solo,  $STR$  a capacidade de campo máxima do solo e  $Capc$  a capacidade de campo máxima do solo em porcentagem (LOPES et al. 1982).

O reservatório do subsolo ( $R_{sub}$ ) pode ser escrito matematicamente:

$$\frac{dR_{sub}}{dt} = Rec - E \text{equação (12)}$$

$$Eb = R_{sub}(1 - Kk) \text{ com } Kk = 0,5^{(1/Kkt)} \text{equação (13)}$$

Onde,  $Eb$  a vazão do escoamento de base e  $Kkt$  é o coeficiente de depleção do reservatório do subsolo, como definido em Lopes et al. (1982).

$$Q_m = (Eb + Ed)CoefConv \text{ equação(14)}$$

Onde é *CoefConv* o coeficiente de conversão de *mm* para *m<sup>3</sup>/s*, e *Q<sub>m</sub>* é a vazão na saída da bacia em *m<sup>3</sup>/s*.

Para a calibração do modelo SMAP, Lopes (1999) sugere que seja feita a partir do início do ano hidrológico, pois neste período (seco) a vazão básica e o teor de umidade estão em seus valores mínimos. Para esta primeira etapa, a etapa de calibração, foram utilizados dados históricos de vazão do posto 86420000 – Estação Ponte do Prata, de precipitação média ocorrida e de evapotranspiração potencial. A calibração foi realizada com o algoritmo de calibração do Solver do Excel, tendo como função objetivo o coeficiente de eficiência estabelecido por Nash e Sutcliffe, que é uma medida normalizada que compara o erro quadrado médio gerado pela simulação com a variância do conjunto de dados observados (SCHAEFLI, 2007), verificando o ajuste dos picos de vazão, conforme a equação:

$$Cns = 1 - \frac{\sum_{t=1}^N (Q_o - Q_s)^2}{\sum_{t=1}^N (Q_o - \bar{Q}_o)^2} \text{ equação(15)}$$

Onde: N é o número de intervalos de tempo, Q<sub>o</sub> e Q<sub>m</sub> são a vazão observada e calculada, respectivamente, t intervalo de tempo.

Conforme Gottshalk e Mtovilov (2000, apud Collischonn, 2001), o Cns pode ser classificado como apropriadamente calibrado para de Cns > 0,75; aceitável, para 0,75 < Cns < 0,36, e não satisfatório para valores inferiores a 0,36.

## RESULTADOS

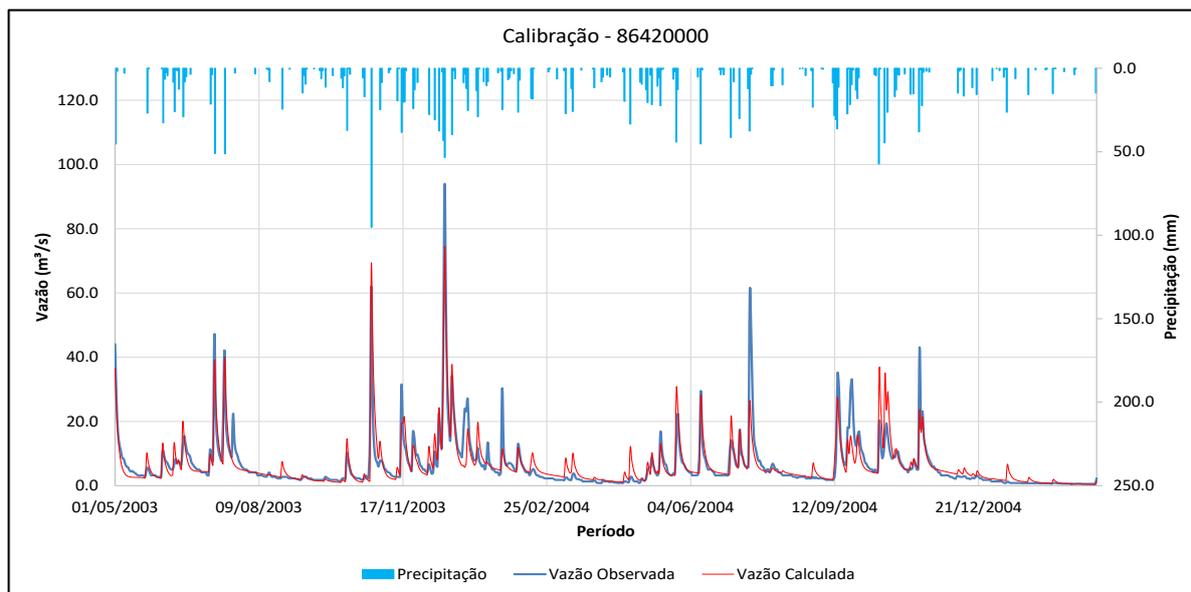
Os dados de entrada do modelo foram a precipitação, evaporação e vazão diárias do período de maio de 2003 a março de 2005. Os parâmetros de entrada e os calibrados são apresentados na Tabela 1 e Tabela 2 respectivamente, enquanto a Figura 3 apresenta o resultado da calibração, cujo valor de Nash-Sutcliffe resultou em 0,77, considerado aceitável.

**Tabela 1 – Parâmetros iniciais**

PARÂMETROS	VALORES INICIAIS
Ai (Abstração Inicial)	4
Capc (Capacidade de Campo)	50
Kkt (Constante de Recessão)	30
Tuin (Teor umidade inicial - ad)	85

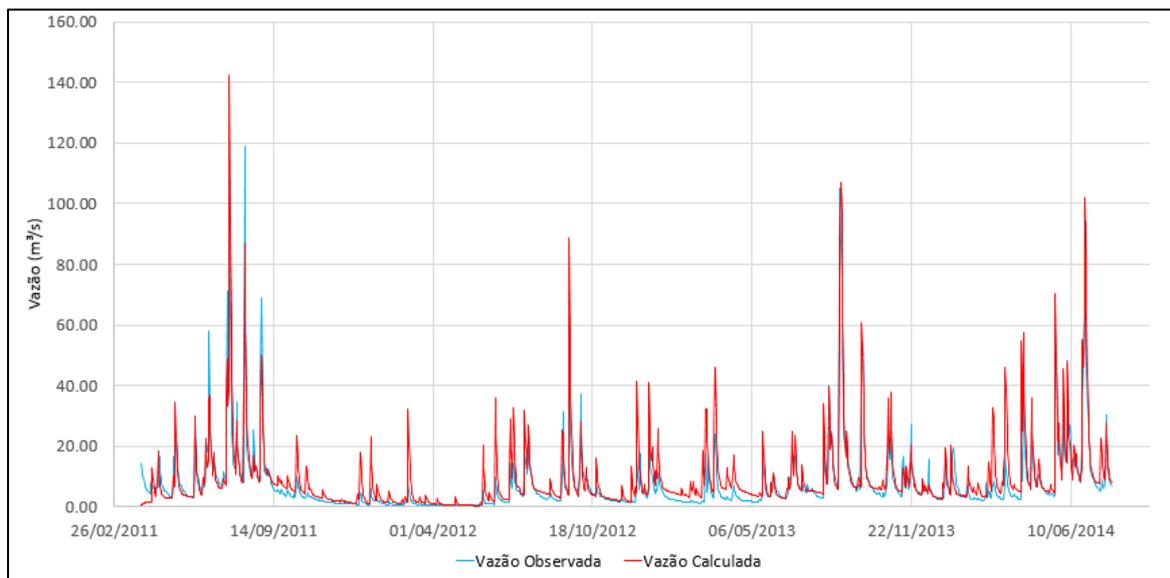
**Tabela 2 – Parâmetros calibrados**

PARÂMETROS	VALORES CALIBRADOS
Sat (Capacidade de saturação do solo - mm)	150,35
k2t (Constante de recessão do escoamento superficial - dias)	1.54
Crec (Coeficiente de Recarga - ad)	5,08



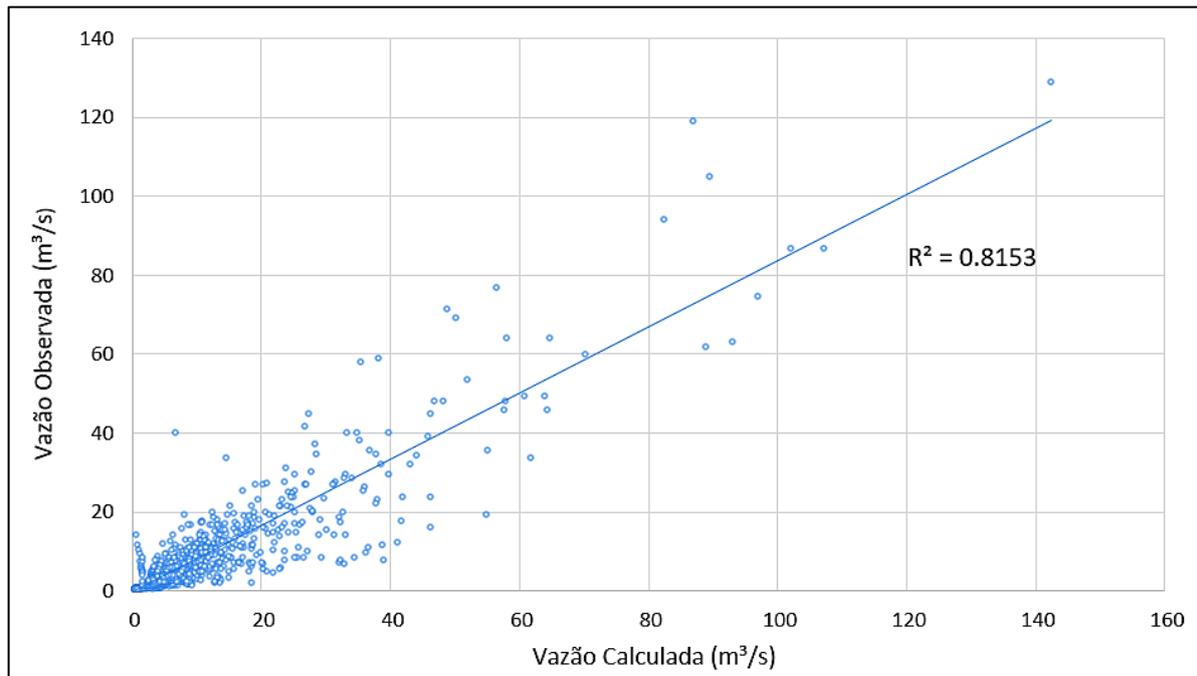
**Figura 3 – Resultado da calibração do modelo SMAP para a bacia de estudo**

Após os valores devidamente calibrados a partir do período de dados de 2003 a 2005, foi realizada a simulação do modelo chuva-vazão para um período de 1218 dias, de abril de 2011 a agosto de 2014, devido à disponibilidade de dados diários, sendo esta apresentada na Figura 4. Esta simulação de estimativa resultou em um coeficiente NASH de 0,70, considerado aceitável pela escala de Gottshalk e Mtovilov (2000, apud Collischonn, 2001).



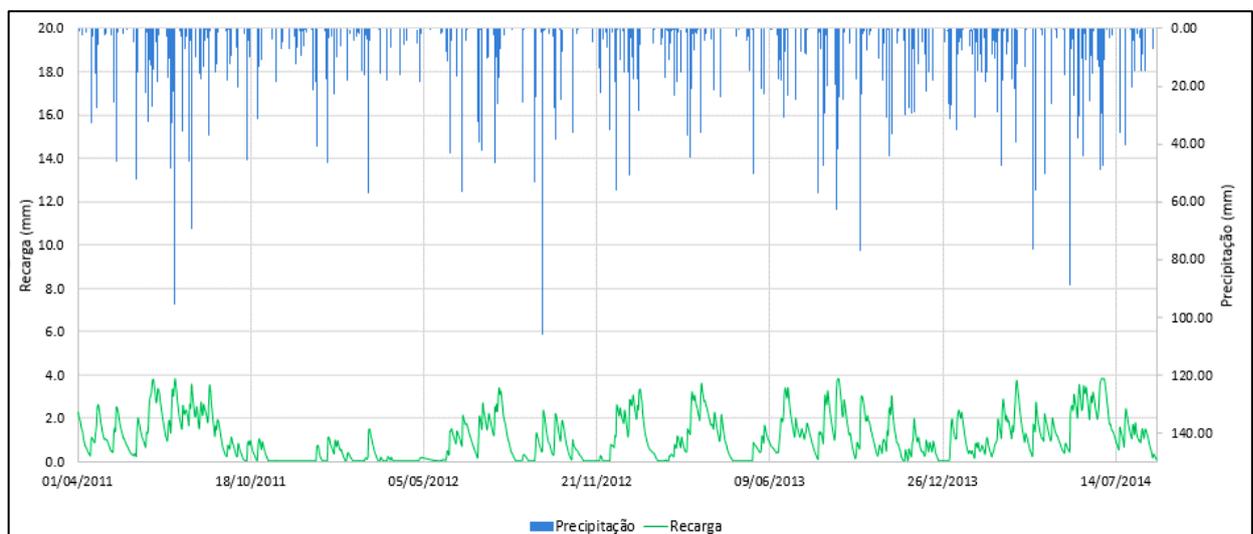
**Figura 4 – Vazão observada versus vazão calculada no período de análise de 1218 dias**

Ao se analisar os gráficos de vazão observada versus vazão calculada, tanto para o período de calibração (Figura 3) como para o período de análise (Figura 4), é possível perceber que ocorreram um bom ajuste entre as curvas de vazão observada e calculada em sua maior parte, porém é importante salientar que alguns picos de vazão observada não foram atingidos pela vazão calculada neste modelo. Este bom ajuste pode ser comprovado pelo diagrama de dispersão do período, que resultou em um coeficiente de determinação  $R^2$  de 0,8153, conforme Figura 5.



**Figura 5 – Diagrama de dispersão da vazão observada versus vazão calculada**

A partir dos resultados satisfatórios obtidos para o ajuste do modelo hidrológico no período de análise de 2011 a 2014, pode-se realizar a simulação da estimativa de recarga aquífera diária para o período de análise, conforme figura 6. Os resultados da estimativa de recarga diária apontam para um valor médio anual correspondente a 19,62% da precipitação média anual no período analisado, cujo valor foi de 1747,30 mm, além de corresponder a 68% da precipitação efetiva. A média mensal de recarga variou de 7,9% no mês de fevereiro, com uma precipitação média de 131,1 mm a 28,6% no mês de julho com precipitação média de 172,07 mm. Destaca-se ainda, que os valores diários de recarga foram inferiores a 4 mm, sendo muito dependente das precipitações ocorridas na bacia hidrográfica.



**Figura 6 – Estimativa de recarga diária**

## CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Através do modelo SMAP utilizado foi possível determinar e calibrar os parâmetros de solo para a região da bacia analisada, visto que os resultados obtidos tanto na parte de validação quanto de análise com os parâmetros calibrados foram considerados bons, já que os coeficientes NASH atingidos através destes parâmetros tiveram valores considerados aceitáveis, podendo desta forma utilizá-los com êxito em estudos futuros desta região para o preenchimento de falhas nas séries hidrológicas históricas.

O modelo hidrológico utilizado apresentou a vantagem de ser de fácil uso e entendimento, possibilitando uma rápida quantificação da recarga aquífera, se utilizando somente de dados hidrológicos considerados simples (vazão, precipitação e evapotranspiração). A estimativa contínua da recarga subterrânea na bacia analisada irá auxiliar na otimização de tomada de decisões quando o assunto for recursos hídricos superficiais ou subterrâneos.

Cabe ressaltar que o modelo SMAP calcula a vazão natural, isto é, sem usos consuntivos que retirariam a água de sua fonte natural e sem o efeito de regularização. Além disso, este modelo hidrológico depende muito da qualidade dos dados de precipitação e vazão observadas, bem como dos dados de evapotranspiração potencial, o que pode levar a uma grande diferença de resultados em caso de outras análises em regiões próximas onde há menor quantidade de dados históricos. É importante salientar também que com possíveis modificações no uso e ocupação do solo ao longo dos anos na bacia analisada, inserção de áreas agrícolas ou aumento da área urbana por exemplo, os parâmetros calibrados como a capacidade de saturação do solo e o parâmetro de recarga subterrânea, poderão ser alterados, sendo necessário assim uma nova calibração para que o modelo tenha uma aplicabilidade com menor erro.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BAYER, D.M.; CASTRO, N.M.R.; BAYER, F.M. *Modelagem e Previsão de Vazões Médias Mensais do Rio Potiribu*. RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v.17, n.2, p.229-239, Abr/Jun 2012.
2. COLLISCHONN, W. *Simulação hidrológica de grandes bacias*. Tese de doutorado. Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS, Porto Alegre, 2001. 270p.
3. LERNER DN; ISSAR AS; SIMMERS I. *Groundwater recharge. A guide to understanding and estimating natural recharge*. IntContribHydrogeolVerlang Heinz Heise 8, 345 p., 1990.
4. LOPES, J. E. G. Manual do modelo SMAP. 1999.
5. LOPES, J.E.G.; BRAGA, B.P.F.; CONEJO, J.G.L. *SMAP – A simplified hydrological model, applied modelling in catchment hydrology*. Ed. V.P. Singh, Water Resources Publications, 1982.
6. OLIVEIRA, M. J. P. M. *Recarga de águas subterrâneas: Métodos de avaliação*. 2004. 475f. Tese (Doutorado em Geologia - Hidrogeologia) – Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2004.
7. SCANLON, B. R.; HEALY, R.; COOK, P. *Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge*. *Hydrogeology Journal*, v. 10, n. 1, p. 18–39, 2002.