

# CARACTERIZAÇÃO DOS AQUÍFEROS DA BACIA DO RIO SIRIRI E ESTIMATIVA DE RECARGA SUBTERRÂNEA COM OS MODELOS WEAP E SMAP

Carlos Eduardo da Silva Araújo<sup>1</sup>; Rogério Moreira Chagas<sup>2</sup>; André Schardong<sup>3</sup>; José de Oliveira Melo Neto<sup>4</sup>; Milena Prado Fontes<sup>5</sup>; Daniele Suzane da Silva Pinto<sup>6</sup>; Felipe Marques Sobral dos Santos<sup>7</sup>; Antônio Jorge Vasconcelos Garcia<sup>8</sup>; Arisvaldo Vieira Mélo Jr.<sup>9</sup>

## Resumo

O objetivo deste trabalho foi realizar uma caracterização dos aquíferos e estimar a recarga subterrânea na bacia do Rio Siriri por meio de dois modelos hidrológicos conceituais que calculam a vazão em função da precipitação. A modelagem foi aplicada utilizando o *Soil Moisture Accounting Procedure* (SMAP) e *Soil Moisture Model* (SMM). Os modelos apresentaram resultados satisfatórios que podem ser confirmado por meio do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) das regressões lineares, considerando a vazão observada e a calculada. A correlação obtida foi de aproximadamente 0,85 e 0,81, utilizando o SMAP e WEAP-SMM, respectivamente. A recarga subterrânea anual média calculada pelo SMAP foi de 78,2 mm, equivalente a  $32,844 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$ , enquanto pelo WEAP-SMM foi de 52,15 mm, equivalente a  $21,904 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$ , para uma precipitação anual média de 1232,2 mm. Os sistemas aquíferos presentes na área de estudo são do tipo cársticos, granular e fissural. A vazão média dos poços no aquífero granular da formação Barreiras foi de  $15,84 \text{ m}^3/\text{s}$ .

## Abstract

The present research has the objective of characterization of groundwater and estimate the groundwater recharge of the basin in Siriri river by means of two concept hydrologic model that

<sup>1</sup> MSc. Eng. de Minas Núcleo de Estudos em Recursos Naturais, UFS, Av. Marechal Rondon, sn, Jardim Rosa Elze, 49000-100, Tel.(79)8854-2643, [cesaraujo@gmail.com](mailto:cesaraujo@gmail.com).

<sup>2</sup> MSc. Agroecossistemas. Núcleo de Estudos em Recursos Naturais, UFS, Av. Marechal Rondon, sn, Jardim Rosa Elze, 49000-100, Tel.(79)3221-5227, [rmoreirachagas@yahoo.com.br](mailto:rmoreirachagas@yahoo.com.br).

<sup>3</sup> Doutorando em Engenharia de Recursos Hídricos - Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da EPUSP, Av. Professor Almeida Prado, 271, CEP 05508-900, São Paulo, SP, Brasil, (11) 30915403, [andreschardong@gmail.com](mailto:andreschardong@gmail.com).

<sup>4</sup> Graduando em Eng. Florestal, UFS, Rua Maria Souza Rosa 91, Conj. Bugio, Aracaju/SE, CEP 49090-180, Tel.(79)3252-4354, [joseneto\\_86@hotmail.com](mailto:joseneto_86@hotmail.com).

<sup>5</sup> Graduada em Saneamento Ambiental, Graduada em Geologia, UFS, Av. Marechal Rondon, sn, Jardim Rosa Elze, 49000-100, Tel.(79)3222-4901, [milageologia@yahoo.com.br](mailto:milageologia@yahoo.com.br).

<sup>6</sup> Graduada em Geologia, UFS, Av. Marechal Rondon, sn, Jardim Rosa Elze, 49000-100, Tel.(79)9925-8630, [danisuzane@hotmail.com](mailto:danisuzane@hotmail.com).

<sup>7</sup> Graduando em Eng. Florestal, UFS, Av. Marechal Rondon, sn, Jardim Rosa Elze, 49000-100, Tel.(79)9975-7775, [felipemsobral@yahoo.com.br](mailto:felipemsobral@yahoo.com.br).

<sup>8</sup> Prof. Dr. Núcleo de Geologia, UFS, Av. Marechal Rondon, sn, Jardim Rosa Elze, 49000-100, Tel.(79)3246-1810, [garciageo@hotmail.com](mailto:garciageo@hotmail.com).

<sup>9</sup> Prof. Dr. Departamento Eng. Agrônômica, UFS, Av. Marechal Rondon, sn, Jardim Rosa Elze, 49000-100, Tel.(79)2105-6566, [arisvaldomello@uol.com.br](mailto:arisvaldomello@uol.com.br)

calculate the discharge in function of the precipitation. The modeling was applied using Soil Moisture Accounting Procedure (SMAP) and Soil Moisture Model (SMM). The models had presented resulted satisfactory that can be confirmed by means of the coefficient of determination ( $R^2$ ) of the linear regressions, considering the observed and measure discharge. The correlation was of approximately 0,85 and 0,81, using SMAP and WEAP-SMM, respectively. The underground recharge annual average calculated for the SMAP was of 78,2 mm, equivalent the  $32,844 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/ano, while for the WEAP-SMM was of 52,15 mm, equivalent the  $21,904 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/ano, for an average annual precipitation of 1232,2 mm. The aquifer systems in the study area are karst, granular and fissural type. The discharge average of the wells in granular aquifer of the Barreiras formation was of 15,84 m<sup>3</sup>/s.

**Palavras-chave:** aquíferos, recarga subterrânea, modelagem hidrológica

## 1 - INTRODUÇÃO

A disponibilidade dos recursos hídricos para sua utilização de forma racional e não predatória está associado ao conhecimento sobre o comportamento das águas superficiais e subterrâneas de modo que a compreensão da circulação da água em bacias hidrográficas bem como sua movimentação em meios subterrâneos permite a tomada de decisão quanto ao uso otimizado de tais recursos. Portanto, o planejamento e a gestão de recursos hídricos se tornam dependente das características específicas que os governam.

Deve-se ressaltar que o sucesso do planejamento e gestão dependem do entendimento integrado entre as fontes superficiais e subterrâneas de modo que a associação desses recursos bem como sua interdependência deve ser estudada e bem compreendida. A relação entre estes dois recursos está fortemente associada à troca de fluxo entre os corpos de água superficiais e os aquíferos, e principalmente com o processo de recarga proveniente da infiltração das chuvas precipitadas nas bacias hidrográficas. Segundo [1], a crescente demanda por água torna essencial a avaliação da recarga dos aquíferos para a determinação adequada dos volumes de água a serem disponibilizados numa bacia hidrográfica para os diversos usos, equacionando assim a relação oferta-demanda com base em critérios econômicos, sociais e ambientais. [2] destacam a impermeabilização, causada pela ocupação desordenada de áreas naturais de recarga, e a sobre-exploração da água subterrânea como os principais problemas relacionados com a ação antrópica que comprometem a disponibilidade hídrica de aquíferos no médio e no longo prazo.

O escoamento dentro do solo ocorre em meio não-saturado (escoamento sub-superficial) e em meio saturado (escoamento subterrâneo) [3]. A recarga de águas subterrâneas é definida como a quantidade de água que se acrescenta à zona saturada de água subterrânea, provocando o aumento do armazenamento de água da zona saturada, sendo sua determinação considerada como o elemento mais importante para o gerenciamento dos recursos hídricos subterrâneos [4].

De acordo com [5] e [6] os processos de recarga de aquíferos estão associados a três mecanismos classificados como: direto, indireto e localizado. No primeiro caso, a recarga está associada à água que é incorporada ao aquífero proveniente da precipitação. No segundo caso, tem relação com a água que percola através do leito de mananciais de superfície, até o nível freático. No último caso, a recarga do aquífero ocorre devido à contribuição dos rios influentes.

Os métodos para estimativa da recarga de aquíferos classificam-se em diretos e indiretos. Os métodos diretos estimam a recarga do aquífero usando como variáveis determinantes a umidade do solo, a evapotranspiração e o escoamento superficial. Os métodos indiretos utilizam informações do nível piezométrico e alguns parâmetros do sistema hidrogeológico para estimar a recarga, tais como: coeficiente de armazenamento, coeficiente de recessão e condutividade hidráulica [1]; [6]. [7] apresentam várias técnicas para a avaliação da recarga, nas quais as escalas de tempo e espaço envolvidas, clima, geologia, geomorfologia, facilidade de aplicação, custo e disponibilidades de dados constituem aspectos importantes na escolha da melhor técnica.

[8] utilizaram três métodos de avaliação de recarga de um aquífero sedimentar livre e raso em uma planície aluvionar no Estado de São Paulo: balanço hídrico anual, variação do nível de água (VNA) no poço e estimativa darcyniana com fluxo constante e ausência de extração de água. O método do balanço hídrico foi pouco sensível para avaliações mensais porque não registra recarga em caso de chuva de pouca intensidade e distribuídas ao longo do ano. O método VNA foi o mais sensível às variações episódicas ou mensais do nível da água apresentando uma recarga de 187 mm no período de setembro de 2003 a janeiro de 2004. [9] verificou que o VNA foi adequado para estimar a recarga de um aquífero livre constituído por sedimentos quaternários (dunas, paleodunas e aluviões) na região litorânea de Fortaleza, considerado como um sistema único. A recarga anual média entre os anos de 1996, 1997 e 1998, foi de 1031,9 mm. [10] compararam o método de balanço de umidade do solo com o modelo de escoamento básico na estimativa da recarga anual em uma bacia de 421,4 km<sup>2</sup> em Taiwan. Os métodos apresentaram resultados semelhantes com valor médio de  $2,47 \times 10^8$  m<sup>3</sup>/ano.

De forma geral, a proposta do uso de modelos que integrem a bacia como um todo, que não envolvam modelagem hidrológica complexa e conhecimento detalhado das características do solo para estimativa da recarga subterrânea, se constituem numa importante contribuição à gestão dos recursos hídricos. [11] comentam que modelos mais simples têm a preferência dos especialistas

pelo fato de apresentarem resultados mais confiáveis em relação aos processos que controlam a infiltração líquida e a recarga potencial.

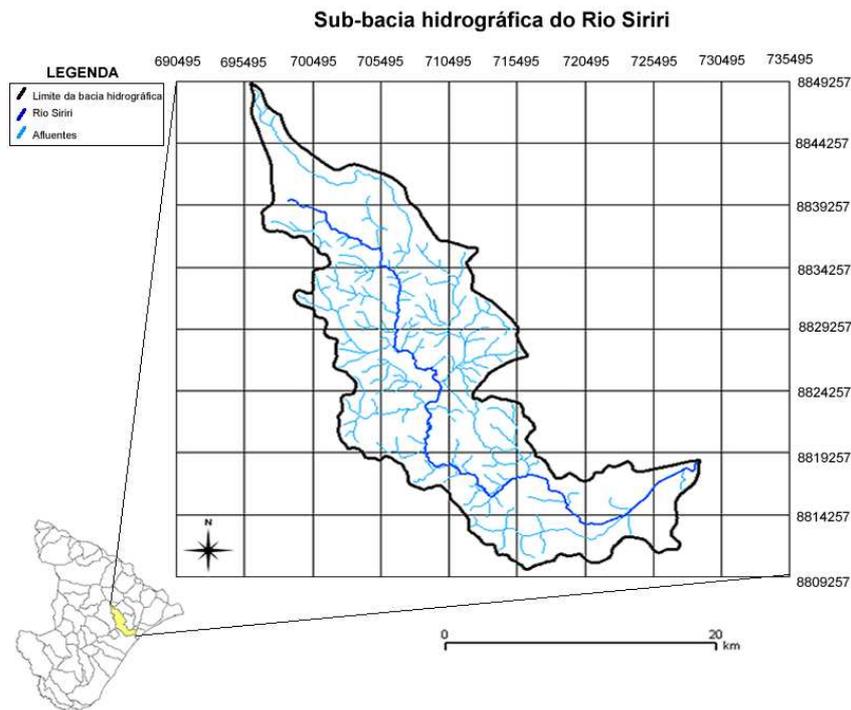
O uso de modelos que podem ser utilizados para a estimativa da recarga dos aquíferos é uma ferramenta importante para o gerenciamento adequado dos recursos hídricos. O objetivo deste trabalho foi realizar uma caracterização dos aquíferos e estimar a recarga subterrânea na bacia do Rio Siriri por meio de dois modelos hidrológicos conceituais que calculam a vazão em função da precipitação. Serão avaliados dois modelos, o WEAP e o SMAP. O WEAP (*Water Evaluation and Planning System*) é um sistema de suporte ao gerenciamento integrado dos recursos hídricos que incorpora modelos de estimativa de recarga e faz uma análise das principais demandas tendo como base informações relativas às principais atividades econômicas desenvolvidas no sistema hidrológico, além de realizar uma análise da disponibilidade hídrica atual e de prever cenários [12]. 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 [13].

## **2 - MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.1 - Área de Estudo**

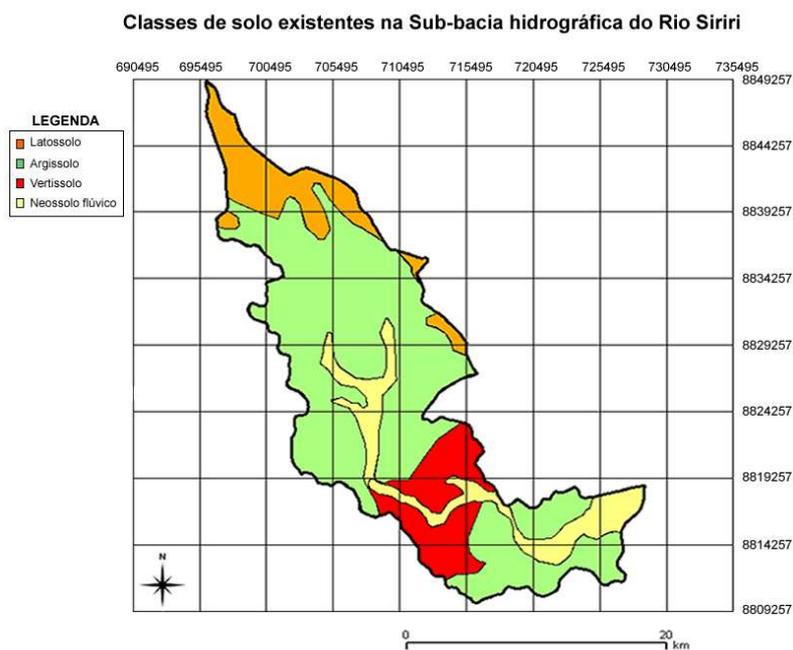
A área em estudo esta inserida na sub-bacia hidrográfica do Rio Siriri, afluente do Rio Japarutuba, no Estado de Sergipe, localizada entre as coordenadas 10°24' e 10°46' de latitude sul e 36°53' e 37°13' de longitude oeste (Figura 1). A sub-bacia engloba nove municípios com área total ou parcialmente incluída em sua área: Nossa Senhora das Dores, Santo Amaro das Brotas, Capela, Divina Pastora, Maruim, General Maynard, Rosário do Catete, Siriri e Carmópolis [14].

De acordo com a classificação de Köppen-Geiger, os tipos climáticos presentes na região são o clima tropical com estação seca no inverno (Aw) e clima semi-árido quente (Bsh), sendo que este último ocupa uma pequena área ao norte da bacia [15].



**FIGURA 1.** Estado de Sergipe com destaque para sub-bacia do Rio Siriri.

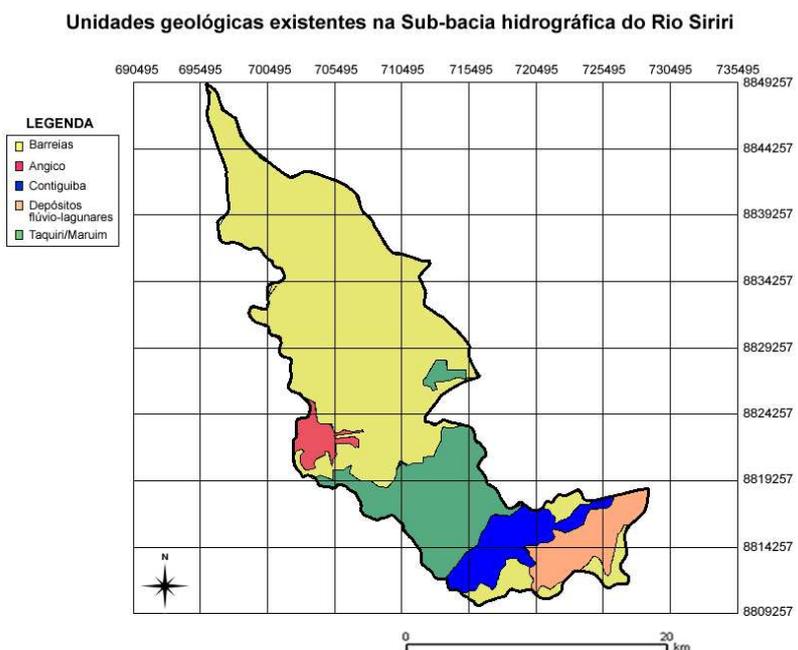
Os tipos de solos que predominam na sub-bacia do Rio Siriri (Figura 2) são: Latossolo Vermelho Amarelo, Argissolo Vermelho Amarelo, Solos Aluviais, Vertissolo e Neossolo Flúvico [14]; [16].



**FIGURA 2.** Tipos de solo na área da sub-bacia do Rio Siriri.

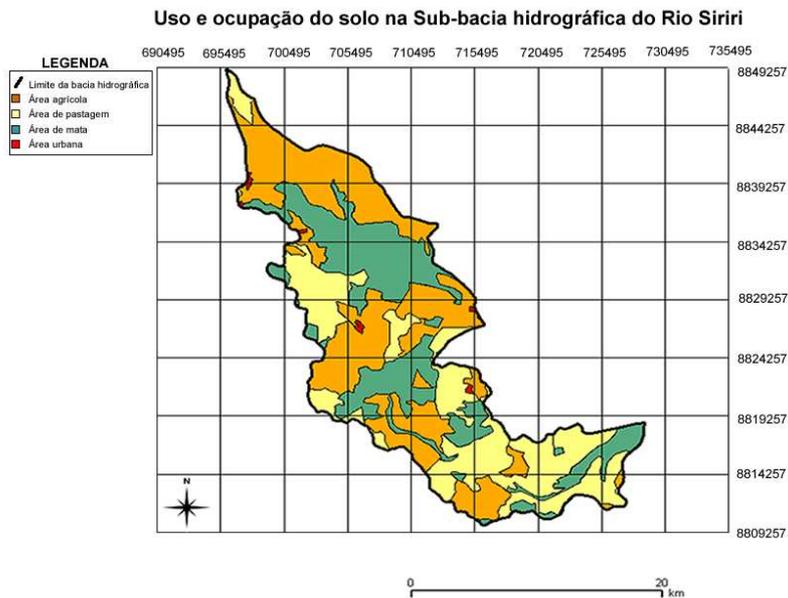
A geologia da região é composta por Bacias Sedimentares do Proterozóico de três Períodos diferentes: do Cretáceo, do Paleogeno e do Quaternário, conforme Figura 3. A Bacia Sedimentar do

Cretáceo compreende o Grupo Sergipe composto pelas formações Cotinguiba (Membro Sapucari), de litotipo calcilutitos e calcário e a Formação Riachuelo onde se insere os membros Taquari/Maruim de litotipo calcarenito, calciculito, calcirrudito e folhelho e o Membro Angico de litotipo calcário e folhelho. No Paleogeno a Unidade presente é o Grupo Barreiras com litologia do tipo arenito, arenito conglomerático e argilito arenoso. Já na Bacia Sedimentar do Quaternário foram depositados litotipos de areia e pelito [14].



**FIGURA 3.** Unidades geológicas presentes na área da sub-bacia do Rio Siriri.

O mapa de uso e ocupação do solo contempla três classes: área agrícola, pastagens e mata, conforme Figura 4. A área agrícola representa 39,42% da área da bacia tendo como principais cultivos cana-de-açúcar, coco, milho e mandioca. As áreas de mata e de pastagens representam 34,61% e 25,97% da área de estudo, respectivamente.

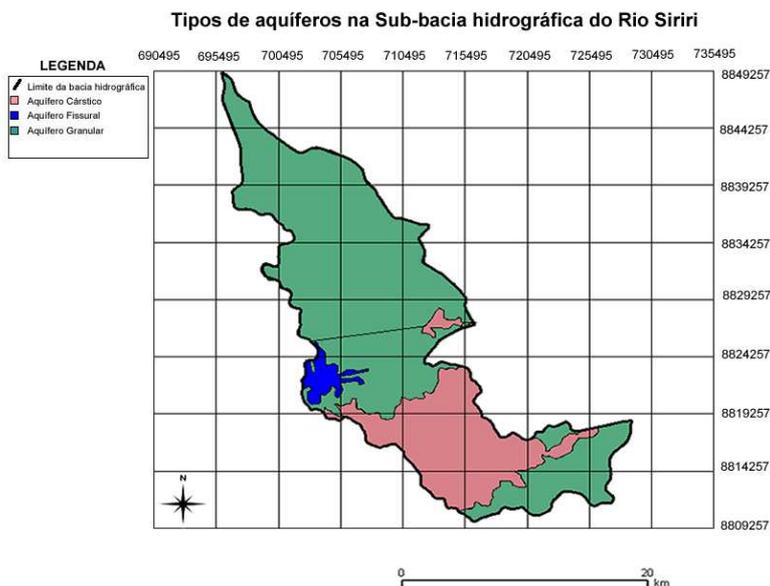


**FIGURA 4.** Uso e ocupação do solo na sub-bacia do Rio Siriri.

Os sistemas aquíferos presentes na área de estudo são Sergipe, Barreiras e uma área composta de granitóides indiscriminados, conforme Figura 5. O aquífero Sergipe, representado pelo Membro Taquari/Maruim da Formação Riachuelo, representa um sistema cárstico, o Barreiras é representado pelo próprio Grupo Barreiras e consiste um sistema do tipo granular, o terceiro aquífero é um sistema do tipo fissural [14]. Considera-se o aquífero Sergipe como correspondendo ao Membro Maruim da Formação Riachuelo, este Membro ocorre em uma faixa diagonal na direção NE-SW, aflorando descontinuamente nesta faixa, alternando-se com o Membro Taquari com o qual se interdigita lateralmente. Na sua extremidade NE, a faixa de afloramento Maruim/Taquari é extensivamente capeada pela Formação Barreiras. O Membro Maruim apresenta espessuras variando entre 100 m e 350 m, sendo litologicamente caracterizado por calcários dolomitizados. Segundo [17] a análise do aquífero por meio de testes de aquífero e perfis litológicos caracterizaram seu comportamento como heterogêneo e anisotrópico, onde exibe feições típicas de circulação cársticas. Em face da litologia predominantemente carbonática, é lícito admitir que a anisotropia seja devida a existência de carstificações. De acordo com dados da [18], os aquíferos associados às zonas fraturadas e de dissolução, representados por sedimentos, metasedimentos e calcários, possuem problemas localizados de dureza e salinidade das águas devido à contribuição das rochas calcárias. A vazão média dos poços que exploram água nesses aquíferos é 15,2 m<sup>3</sup>/h e sua profundidade é de 62 m [18].

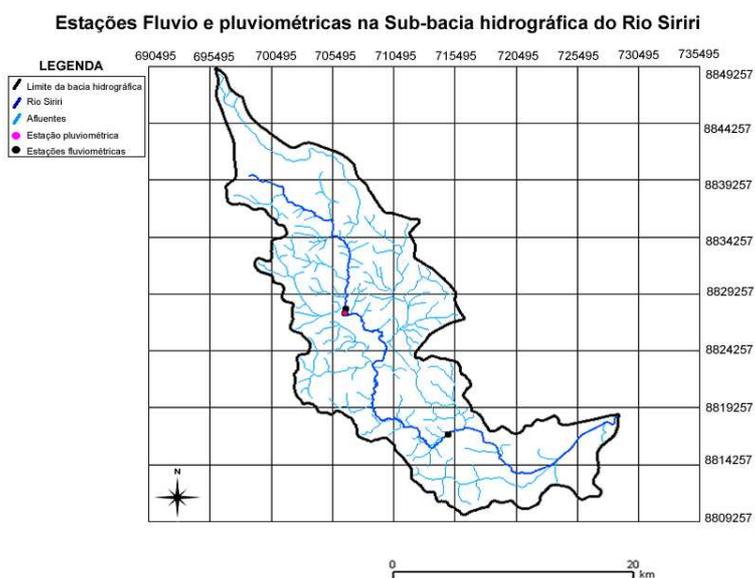
O aquífero Barreiras recobre indiferentemente o cristalino e os sedimentos mais antigos, embora de forma descontinuada, sendo constituída de sedimentos inconsolidados representados por siltes, areias mal selecionadas e argilas, atingindo a espessura máxima de 170 m [17]. Esses aquíferos caracterizam-se como aquíferos livres ou confinados de extensão regional limitada,

formado por sedimentos clásticos consolidados, predominantemente arenoso. A qualidade química das águas, em geral é boa e a vazão média dos poços que exploram água desses aquíferos é 15,3 m<sup>3</sup>/h e sua profundidade 63 m [18].



**FIGURA 5.** Tipos de aquíferos presentes na área da sub-bacia do Rio Siriri.

No Rio Siriri existem duas estações fluviométricas ativas da Agência Nacional de Águas (ANA) com séries históricas de cota e vazão: 50046000 (mais próxima à nascente) e 50047000 (mais próxima à foz) e uma estação pluviométrica desativada (1037047), mas que possui série histórica disponível, conforme Figura 6. A série de vazão e precipitação utilizada foi de janeiro de 1975 a dezembro de 1981.



**FIGURA 6.** Estações fluviométrica e pluviométricas na sub-bacia do Rio Siriri.

## 2.2 - O SOFTWARE WEAP

O WEAP é uma ferramenta completa de suporte à gerência integrada dos recursos hídricos, que faz a análise da disponibilidade hídrica levando em consideração as demandas para abastecimento público, agrícola e industrial, além de considerar também a demanda necessária à manutenção dos processos físicos, químicos e biológicos dos ecossistemas associados à área em estudo em condições presentes e futuras [12]. O software dispõe de modelos matemáticos que permite simular cenários prováveis em função de uma variação da economia, demografia, parâmetros hidrológicos e hidrogeológicos. A interface permite associar um modelo de simulação tridimensional de fluxo de água subterrânea (MODFLOW) por meio do método de diferenças finitas [19]. Os modelos podem ser gerados para as demandas e suprimentos de água do sistema com os passos de tempo diário, semanal, mensal ou anual.

Para construção do sistema hídrico no WEAP pode-se usar uma combinação dos diversos objetos, tais como a conexão entre corpos de água superficial ou subterrâneo e os locais de demanda (para cada local de demanda deve existir uma conexão uma fonte e um retorno de fluxo para um rio ou para uma estação de tratamento de efluente), a conexão entre o escoamento superficial e a infiltração, e a representação esquemática do rio e do aquífero e as interações entre eles.

A bacia hidrográfica é representada por um objeto no qual é possível especificar valores de precipitação, evapotranspiração, fluxo superficial, irrigação dentre outros. A área de captação é definida pelo usuário. Se na bacia existir uma área de irrigação será necessário utilizar as conexões de transmissão que comunica o fluxo de água de alguma fonte superficial ou subterrânea para a bacia hidrográfica e, portanto, devem ser informadas variáveis adicionais para caracterizar a atividade de irrigação.

### 2.2.1 - O Modelo de Umidade do Solo SMM do WEAP

O modelo SMM (*Soil Moisture Model*), representa a bacia hidrográfica através de duas camadas de solo de forma unidimensional e baseia-se em funções empíricas que descreve, na camada superior, a evapotranspiração, chuva, irrigação, escoamento superficial e interfluxo bem como mudanças na saturação do solo. O método permite a caracterização do uso da terra e os impactos no solo que ocorrem e requer muitos parâmetros sobre o solo e o clima para simular tais processos. A percolação profunda proveniente da bacia pode também ser transmitida diretamente a um aquífero através de uma conexão entre o escoamento superficial e a infiltração (*Runoff/Infiltration link*).

O modelo permite a divisão da área da bacia hidrográfica por diferenças quanto ao uso da terra, calculando um balaço hídrico para cada uma dessas áreas. O clima é considerado uniforme sob cada sub-bacia e o balanço hídrico é calculado utilizando a Equação 1.

$$Rd_j \frac{dz_{1,j}}{dt} = P_e(t) - PET(t)k_{c,j}(t) \left( \frac{5z_{1,j} - 2z_{1,j}^2}{3} \right) - P_e(t)z_{1,j}^{LAI_j} - (1 - f_j)k_j z_{1,j}^2 - f_j k_j z_{1,j}^2 \quad (1)$$

em que  $j$  é o índice que representa uma fração da área da bacia caracterizada pelo tipo e uso do solo;  $Rd_j$  é o armazenamento efetivo da zona de raízes para uma porção  $j$  da área da bacia;  $Z_{1,j} = [0,1]$  é o armazenamento relativo dado em fração do armazenamento efetivo total da zona radicular ( $Rd_j$ ) para uma porção  $j$  da área da bacia;  $P_e$  é a precipitação efetiva;  $PET$  é a evapotranspiração potencial baseado no método de Penman-Montieth;  $k_{c,j}$  é o coeficiente de cultura para uma porção  $j$  da área da bacia;  $LAI_j$  é o coeficiente de área foliar para uma porção  $j$  da área da bacia;  $k_j$  é a condutividade da zona radicular para uma porção  $j$  da área da bacia;  $f_j$  é o coeficiente de particionamento do fluxo horizontal e vertical de acordo com o tipo de solo, tipo de cobertura do solo e topografia.

Quando o modelo não apresenta conexão entre um aquífero e a bacia hidrográfica, o fluxo de base origina-se de uma segunda camada e é determinada pela Equação 2.

$$S_{max} \frac{dz_2}{dt} = \left( \sum_{j=1}^N f_j k_j z_{1,j}^2 \right) - k_2 z_2^2 \quad (2)$$

em que  $S_{max}$  é a percolação oriunda da camada superior e determinada por meio do balanço hídrico (Equação 1);  $K_2$  é a condutividade da camada inferior; e  $Z_2 = [0,1]$  é o armazenamento relativo dado em fração do armazenamento da camada inferior.

Se houver uma conexão entre um aquífero e a bacia a segunda camada é ignorada e a recarga  $R$  do aquífero e dada pela Equação 3.

$$R = \sum_{j=1}^N A_j (f_j k_j z_{1,j}^2) \quad (3)$$

em que  $A$  é a área de contribuição associada à porção  $j$  da bacia hidrográfica.

Os dados de entrada do SMM são a precipitação média mensal, a temperatura média mensal e o coeficiente de cultivo (Kc). Os valores de precipitação mensal foram retirados da série histórica da estação pluviométrica 1037047 da ANA. A temperatura média mensal para o município de Siriri

foi obtida junto à Secretaria de Estado do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos de Sergipe (SEMARH).

Os valores do Kc foram obtidos considerando o mapa de uso e ocupação do solo da sub-bacia do Rio Siriri, considerando as três classes: área agrícola, pastagens e mata, conforme Tabela 1. Para área agrícola foram consideradas as quatro principais culturas exploradas na região da sub-bacia: cana-de-açúcar, coco, milho e mandioca. Os valores do Kc adotados para as culturas e para a pastagem são valores padronizados no Documento FAO de Irrigação e Drenagem nº 56 [20], considerando todas as espécies vegetais em pleno desenvolvimento.

Como não há um levantamento florístico definindo quais espécies florestais predominam na área da sub-bacia do Rio Siriri, para o valor do Kc da área de mata considerou-se que a vegetação predominante cobriria 100% do solo, assumindo assim o valor de referência 1,0, seguindo recomendação preconizada em [21] que definem o Kc em função do Índice de Área Foliar (IAF) da vegetação.

**Tabela 1.** Classes de uso e ocupação do solo na sub-bacia do Rio Siriri.

Classe	Cultura	Kc	Área (km <sup>2</sup> )	Kc utilizado
Área agrícola	Cana-de-açúcar	1,25	98,5	1,14*
	Coco	0,8	32,8	
	Milho	1,2	21,3	
	Mandioca	1,1	16,6	
Pastagem	-	0,75	108,12	0,75
Mata	-	1,0	144,09	1,0

(\*) Valor de Kc ponderado de acordo com a área ocupada por cada cultura.

### 2.3 - O Modelo SMAP

O modelo SMAP é um modelo hidrológico conceitual e concentrado do tipo chuva-vazão, que realiza o balanço da umidade do solo baseado em dois reservatórios lineares que representam a camada superior do solo e o aquífero [13]. As variáveis de estado são atualizadas a cada mês de acordo com as Equações 4 e 5.

$$R_{solo}(i+1) = R_{solo}(i) + P - E_s - E_r - R_{ec} \quad (4)$$

$$R_{sub}(i+1) = R_{sub}(i) + R_{ec} - E_b \quad (5)$$

em que  $R_{solo}$  é o reservatório do solo (zona não saturada) em mm,  $R_{sub}$  é o reservatório subterrâneo (zona saturada) em mm,  $P$  é a precipitação (mm),  $E_s$  é o escoamento superficial (mm),

$E_r$  é a evapotranspiração real (mm),  $Rec$  é a recarga subterrânea (mm) e  $E_b$  é o escoamento básico (mm).

As funções de transferência são dadas pelas Equações 6, 7, 8, 9 e 10.

$$E_s = Tu^{pes} \quad (6)$$

$$E_r = Tu * Ep \quad (7)$$

$$Rec = Crec * Tu^4 \quad (8)$$

$$E_b = (1 - Kk) * Rsub \quad (9)$$

$$Tu = (Rsolo / Sat) \quad (10)$$

em que  $Tu$  é o teor de umidade (ad.),  $Sat$  é a capacidade de saturação do solo (mm),  $Pes$  é o parâmetro de escoamento superficial (ad.),  $Ep$  é a evapotranspiração potencial (mm),  $Crec$  é o coeficiente de recarga (ad.),  $Kk$  é o constante de recessão ( $mês^{-1}$ ).

Os parâmetros  $Crec$  e  $Tu$  são multiplicados por 100. A constante de recessão  $Kk$  é determinada por meio da Equação 13 que depende do parâmetro  $Kkt$  expresso em meses em que a vazão básica cai a metade de seu valor (não considerando recarga nesse período). O eventual transbordo do reservatório do solo é transformado em escoamento superficial. A inicialização do modelo é feita com as Equações 11 e 12. Recomenda-se escolher o ano hidrológico da região em estudo e dessa forma, iniciar a calibração pelo mês mais seco, pois nesse período a umidade do solo e a vazão básica estão em seus valores mínimos. A vazão é dada pela Equação 14.

$$Rsolo(1) = Tuin * Str \quad (11)$$

$$Rsub(1) = Ebin * Ad * 2630 / (1 - Kk) \quad (12)$$

$$Kk = 0,5^{1/Kkt} \quad (13)$$

$$Q = (Es + Eb) * Ad / 2630 \quad (14)$$

em que  $Ebin$  é o escoamento básico inicial (mm),  $Ad$  é a área de drenagem da bacia ( $km^2$ ).

### 3 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 - Caracterização dos Aquíferos

Na Tabela 2 estão os 17 poços tubulares cadastrados na área da sub-bacia do Rio Siriri. A maior parte dos poços está concentrada na área do município de Siriri, sendo utilizados

principalmente no abastecimento doméstico das sedes municipais e de localidades rurais. A maior parte dos poços está inserida na Província Costeira Sergipe/Alagoas, em aquíferos do Grupo Barreiras que, conforme pode ser observado na Tabela 2, apresentam uma vazão média de 15,84 m<sup>3</sup>/h. De acordo com [22] os aquíferos existentes nessa formação apresentam bons índices de produtividade média, sendo bastante aproveitados para o abastecimento populacional, e apresentando profundidade média de 65 m, nível estático médio de 13,8 m e vazão média de 8,7 m<sup>3</sup>/h.

**Tabela 2.** Poços tubulares cadastrados na área da sub-bacia do Rio Siriri [14].

<b>Poços tubulares localizados na sub-bacia do Rio Siriri</b>							
Código	Município	UTM		Aquífero		NE (m)	Q (m <sup>3</sup> /h)
		E	N	Formação	Membro		
LP95	Capela	712275	8832202	-	-	6,39	-
LP100	Siriri	705121	8830839	Barreiras	-	15,18	5,11
LP101	Siriri	703431	8831457	Barreiras	-	-	0,44
LP102	Siriri	708938	8834194	-	-	-	-
LP103	Siriri	705924	8837646	-	-	-	-
LP104	Siriri	701809	8835220	-	-	-	-
LP105	Siriri	710473	8827854	-	-	-	-
LP115	Rosário do Catete	715072	8816478	-	-	-	-
LP116	General Maynard	721137	8816592	Cotinguiba	Sapucari	13,57	15,80
LP117	General Maynard	724440	8817242	Cotinguiba	Sapucari	-	2,95
LP118	Maruim	708972	8817325	Riachuelo	Maruim	3,00	25,50
LP121	Santo Amaro das Brotas	725286	8814004	-	-	-	-
LP122	Santo Amaro das Brotas	725125	8812890	Barreiras	-	-	7,30
LP123	Santo Amaro das Brotas	725745	8814985	Barreiras	-	1,72	58,20
LP172	Siriri	706770	8822749	-	-	-	-
LP173	Siriri	710787	8824654	-	-	2,91	-
LP178	Divina Pastora	707869	8822456	Barreiras/Riachuelo	Taquari	4,81	8,16

### 3.2 - Calibração dos Modelos WEAP-SMM e SMAP

Na fase de calibração do WEAP-SMM e do SMAP foi considerada a área de drenagem até a estação fluviométrica 50047000 da ANA correspondente a 302 km<sup>2</sup>. A área total da sub-bacia do Rio Siriri é de 420 km<sup>2</sup>.

Os parâmetros utilizados para calibração do WEAP-SMM foram: fator de resistência ao escoamento superficial, capacidade de retenção de água no solo, condutividade hidráulica e

saturação inicial do solo na zona radicular. Para estes parâmetros foram estabelecidos intervalos de valores onde foi escolhido o valor otimizado para a calibração final (Tabela 3). Os valores ótimos foram determinados por tentativa. Ainda na Tabela 3 são apresentados os valores utilizados para os parâmetros climáticos como latitude, velocidade média dos ventos e nebulosidade.

**Tabela 3.** Parâmetros do modelo WAEP-SMM.

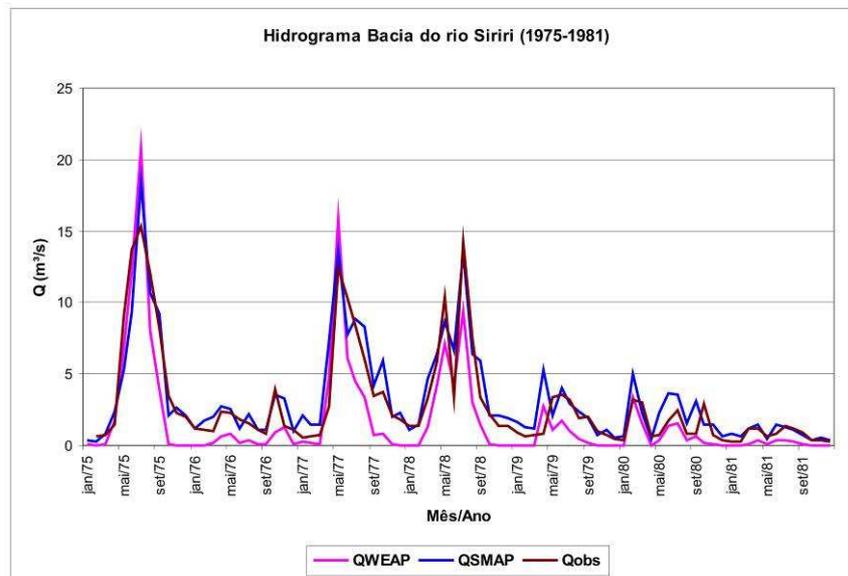
<b>Parâmetros associados ao uso do solo</b>						
Parâmetros	<b>Classes de uso do solo</b>					
	<b>Área Cultivada</b>		<b>Pastagem</b>		<b>Mata</b>	
	Faixa de valores	Valor calibrado	Faixa de valores	Valor calibrado	Faixa de valores	Valor calibrado
Fator de resistência ao escoamento superficial	0,1 – 3	2	3 – 5	4	4 – 7	5
Capacidade de retenção de água no solo (mm)	300 - 800	400	300 - 800	400	300 - 800	400
Condutividade na zona de raiz (mm/mês)	10 – 50	30	10 – 50	30	10 – 50	30
Saturação inicial do solo (%)	20 – 50	30	20 – 50	30	20 – 50	30
<b>Parâmetros Climáticos</b>						
Latitude	- 10°					
Velocidade média dos ventos	2 m/s					
Fração de nuvens	40 %					

Os dados de entrada do SMAP são a série mensal de precipitação, as médias mensais multianuais de evapotranspiração potencial (ET<sub>o</sub>), a umidade inicial do solo (50%), o escoamento básico inicial (0,15 m<sup>3</sup>/s) e a área da bacia. Para calibração são necessários dados observados de vazão média mensal. As séries de dados mensais de precipitação e vazão foram de janeiro de 1975 até dezembro de 1981. O modelo dispõe de rotinas de otimização que executam a calibração automática dos parâmetros, mas também permite o ajuste manual dos mesmos. Os quatro parâmetros do modelo foram calibrados e assumiram os seguintes valores: Sat = 1609 mm, Pes = 3,6972, Crec = 3,8586 e Kkt = 1.

Existem dois coeficientes de ajuste da chuva média da bacia P<sub>cof</sub> e ajuste da evapotranspiração média da bacia E<sub>cof</sub> que devem ser calculados em função da distribuição espacial dos postos. Nesta aplicação o E<sub>cof</sub> foi de 1,4 e o P<sub>cof</sub> foi igual a um. Os valores de ET<sub>o</sub> mensais para a região da bacia do Rio Siriri foram obtidos dos resultados gerados pelo trabalho de [23], que utilizaram a média climatológica mensal de temperatura para estimar a ET<sub>o</sub> média mensal para todo o Estado de Sergipe utilizando os parâmetros do método empírico de [24].

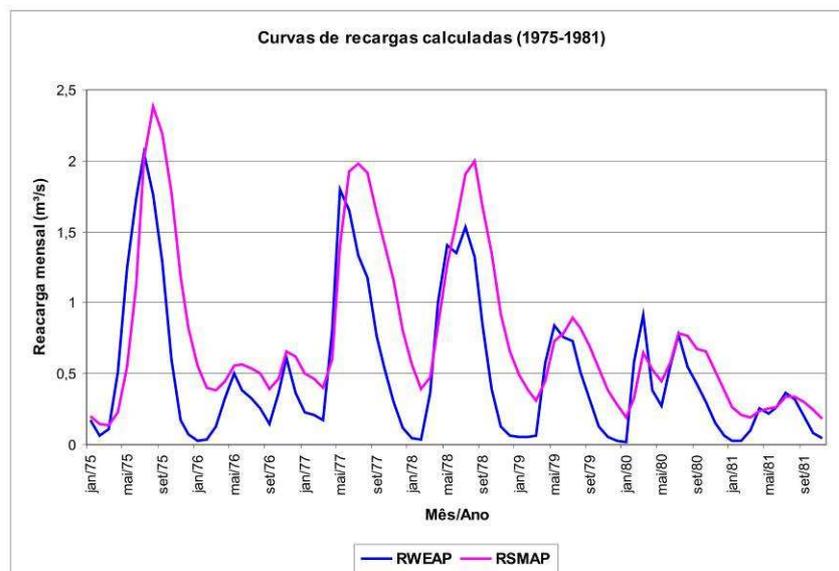
Na Figura 8 são apresentados os hidrogramas observados (Q<sub>obs</sub>) e estimados no WEAP-SMM e no SMAP (Q<sub>WEAP</sub> e Q<sub>SMAP</sub>) para o período de 1975 a 1981. Verifica-se que há um bom ajuste entre as curvas Q<sub>SMAP</sub> e Q<sub>obs</sub>, sendo que na maior parte do período os valores de Q<sub>SMAP</sub>

superestimam os valores de Qobs. Os valores de QWEAP subestimam os valores de Qobs na maior parte do período analisado.



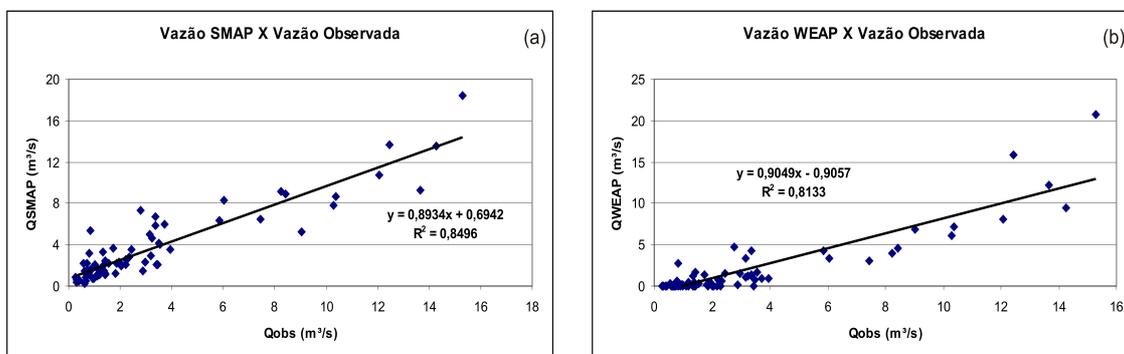
**FIGURA 8.** Hidrogramas estimado e observado para sub-bacia do Rio Siriri.

A Figura 9 mostra a correlação entre os valores de recarga calculados no WEAP-SMM (RWEAP) e no SMAP (RSMAP). Pode-se perceber que há alguns períodos de sobreposição das curvas, contudo na maior parte do período verifica-se que os valores de RWEAP subestimam os valores de RSMAP. Os valores máximo e mínimo para RWEAP e RSMAP são: (2,054 m<sup>3</sup>/s e 0,0165 m<sup>3</sup>/s) e (2,383 m<sup>3</sup>/s e 0,1344 m<sup>3</sup>/s), respectivamente.



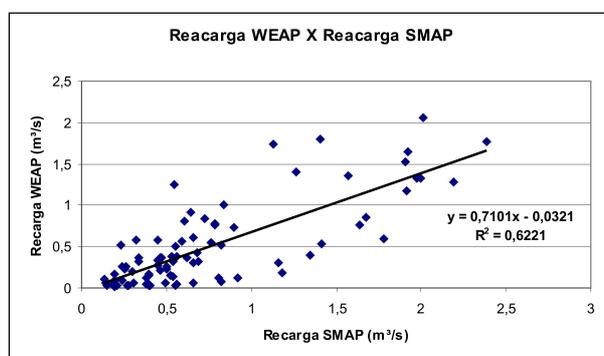
**FIGURA 9.** Recarga estimada (m<sup>3</sup>/s) no WEAP e no SMAP para sub-bacia do Rio Siriri.

A Figura 10 mostra a regressão linear QSMAP x Qobs (a) e QWEAP x Qobs (b). O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) das regressões mostra uma correlação de aproximadamente 85,0% entre os valores de QSMAP e Qobs, e de aproximadamente 81,0% entre os valores de QWEAP e Qobs, mostrando um bom ajuste entre as curvas de vazões.



**FIGURA 10.** Retas de regressão linear para QSMAP e Qobs (a), e QWEAP e Qobs (b).

Os valores de recargas calculados pelo WEAP-SMM e pelo SMAP foram correlacionados na regressão linear apresentada na Figura 11. O valor o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) encontrado para reta de regressão mostra um ajuste de aproximadamente 62,0% entre a recarga do WEAP-SMM e a recarga do SMAP, evidenciando um ajuste satisfatório para o objetivo proposto no presente trabalho.

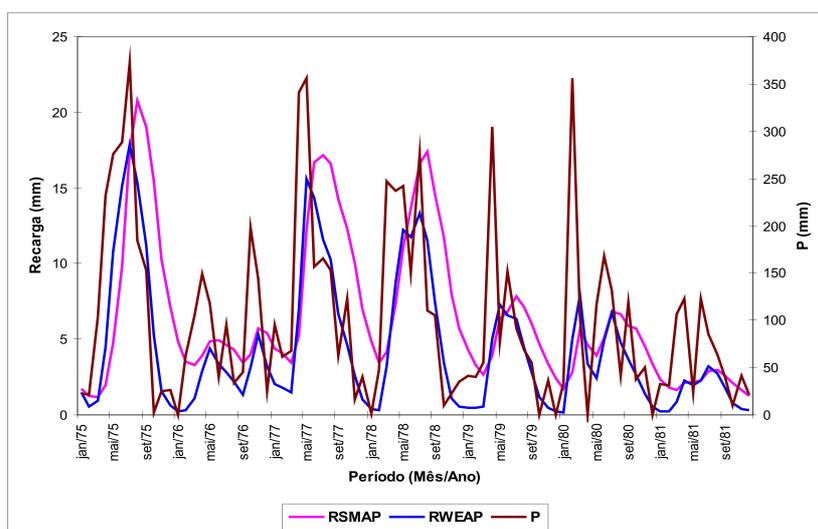


**FIGURA 11.** Retas de regressão linear para a recarga estimada no WEAP-SMM e no SMAP.

Após a calibração dos modelos foram calculadas as recargas subterrâneas considerando toda a área da bacia ( $420 \text{ km}^2$ ). A Figura 12 apresenta os valores de recarga calculados pelos modelos WEAP-SMM e SMAP e os dados de precipitação no período analisado. Observa-se uma coerência entre a precipitação e as recargas calculadas em termos sazonais. A recarga subterrânea é maior logo após o período de maior precipitação. Os picos de precipitação ocorridos em abril de 1979 e junho de 1980 não foram suficientes para gerar nem escoamento superficial (Figura 8) nem para gerar recarga subterrânea expressivos (Figura 12). A recarga subterrânea anual média calculada

pelo SMAP foi de 78,2 mm, equivalente a  $32,844 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$ , enquanto pelo WEAP-SMM foi de 52,15 mm, equivalente a  $21,904 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$ , para uma precipitação anual média de 1232,2 mm.

[8] encontraram uma recarga de 187 mm em um período de cinco meses em sistema aquífero sedimentar com  $1452 \text{ km}^2$ , para uma precipitação acumulada de 558 mm, em São Paulo. [9] encontrou um valor de recarga anual média de 1031,9 mm em um sistema aquífero constituído por sedimentos quaternário em uma área de  $16,77 \text{ km}^2$ , para uma precipitação anual média de 1500 mm, em Fortaleza. [10] encontraram uma recarga média de  $2,47 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{ano}$ , em uma bacia de  $421,4 \text{ km}^2$ , com tipo predominante de solo franco argiloso, e uma precipitação média anual de 2100 mm, em Taiwan.



**FIGURA 12.** Precipitação e recarga estimada no WEAP-SMM e no SMAP.

A Tabela 4 apresenta a relação entre a recarga subterrânea e a precipitação obtida pelos modelos WEAP-SMM e SMAP para a bacia do Rio Siriri e os dados médios obtidos por outros autores. No SMAP os valores variaram de 0,037 a 0,080 para o período analisado com uma média de 0,060, enquanto no WEAP-SMM os valores variaram de 0,024 a 0,050, com uma média de 0,040. Isso significa que a recarga subterrânea representa 6,0% da precipitação para valores gerados no SMAP e 4,0% para valores gerados no WEAP-SMM. Esse valor ficou muito abaixo dos encontrados em outros estudos no Brasil e foi metade do encontrado em estudos em Taiwan. As discrepâncias verificadas entre as recargas podem ser explicadas pelo uso de diferentes modelos, pelas características climáticas, de solo e dos aquíferos nas diferentes regiões.

**Tabela 4** Precipitação anual (P) e recarga (RSMAP, RWEAP, [8], [9] e [10]).

Ano	P (mm)	Recarga (fração da precipitação)				
		RSMAP	RWEAP	[8]	[9]	[10]
1975	1707,4	0,065	0,050			
1976	1014,6	0,052	0,030			
1977	1637,6	0,075	0,048			
1978	1484,1	0,080	0,050			
1979	922,1	0,064	0,039			
1980	1158,5	0,049	0,038			
1981	700,9	0,037	0,024			
Média	1232,17	0,060	0,040	0,335	0,688	0,115

#### 4 - CONCLUSÕES

As características dos aquíferos e a estimativa da recarga subterrânea na bacia do Rio Siriri foram analisadas neste trabalho. Na bacia existem três tipos de aquíferos, sendo que a maior parte da área é ocupada pelo aquífero granular da formação Barreiras, que apresenta poços com uma vazão média de 15,84 m<sup>3</sup>/h.

Os modelos utilizados para a estimativa da recarga subterrânea foram considerados satisfatórios. Os coeficientes de determinação da correlação linear ( $R^2$ ) entre as vazões observadas e as calculadas pelos modelos WEAP-SMM e SMAP foram de 81% e 85%, respectivamente. As recargas estimadas pelos modelos apresentaram um coeficiente de determinação de 62% com os valores anuais médios de 78,2 mm ( $32,844 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/ano) e 52,15 mm ( $32,844 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/ano) estimados pelos modelos SMAP e WEAP-SMM, respectivamente. Esses valores representaram em média uma razão de recarga de 6,0% e de 4,0% em relação a precipitação anual da bacia para os modelos estudados.

Os modelos apresentam as vantagens de serem de fácil uso e de possibilitarem a estimativa da recarga com dados hidrológicos e de solo mais fáceis de serem encontrados. A estimativa da quantidade de recarga subterrânea contínua permite otimizar a tomada de decisão no que se refere à gestão integrada dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos, sem depender de grandes quantidades de dados que definem os processos físicos do fluxo subterrâneo que são difíceis de serem encontrados.

## 5 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. PARALTA, E. A. *et al.* Avaliação da recarga do sistema aquífero dos Gabros de Beja segundo critérios múltiplos – Disponibilidades hídricas e implicações agroambientais. In: Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa, 6, 2003, Cabo Verde. *Anais...* Cabo Verde: APRH, 2003. CD-Rom.
2. BARBOSA, C. M. S.; MATTOS, A. Conceitos e diretrizes para recarga artificial de aquíferos. In: Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 15, 2008, Natal. *Anais...* Natal: ABAS, 2003. CD-Rom.
3. TUCCI, E. M. C.; CABRAL, J. J. S. P. Qualidade da água subterrânea. *Prospecção Tecnológica: Recursos Hídricos*. Brasília: CGEE, 2003. 53p.
4. FREEZE, R. A.; CHERRY, J. A. *Groundwater*. Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs. NJ. 604 p. 1979.
5. OLIVEIRA, M. J. P. M. *Recarga de águas subterrâneas: Métodos de avaliação*. 2004. 24f. Tese (Doutorado em Geologia) – Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2006.
6. LERNER, D. N.; ISSAR, A. S.; SIMMERS, I. *Groundwater Recharge. A guide to understanding and estimating natural recharge*. Internat. Assoc. of Hydrogeologists. International Contributions to Hydrogeology: vol.8. Hannover: Heise, 1990.
7. SCANLON, B. R.; HEALY, R. W.; COOK, P. G. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology Journal*, v. 10, n. 1, p. 18-39, 2002.
8. 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, p. 15-25, 2005.
9. VASCONCELOS, S. M. S. Avaliação da recarga subterrânea através da variação do nível potenciométrico no aquífero Dunas/Paleodunas, Fortaleza, Ceará. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 10, n. 2, p. 49-57, 2005.
10. LEE, C-H.; YEH, H-F.; CHEN, J-F. Estimation of groundwater recharge using the soil moisture budget method and the base-flow model. *Environment Geology*, v. 54, p. 1787-1797, 2008.
11. YE, M.; POHLMANN, K. F.; CHAPMAN, J. B. Expert elicitation of recharge model probabilities for the Death Valley regional flow system. *Journal of Hydrology*, v. 354, p.102-115, 2008.
12. YATES, D. *et al.* WEAP21 – A demand, priority, and preference-driven water planning model. Part 1: Model Characteristics. IWRA, *Water International*, v. 30, n. 4, p. 487-500, 2005.

13. 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.
14. SERGIPE (Estado). Superintendência de Recursos Hídricos. *Atlas Digital sobre os Recursos Hídricos de Sergipe*. ARACAJU: SEPLANTEC-SRH, 2004. CD-Rom.
15. PEEL, M. C.; FINLAYSON, B. L.; McMAHON, T. A. Updated world Köppen-Geiger climate classification map. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 11, p. 1633–1644, 2007.
16. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. *Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos*. 2. Ed. Rio de Janeiro, Embrapa Solos, 2006. 306p.
17. FEITOSA, E. C.; DEMETRIO, J. G. A.; MANOEL FILHO, J. *Avaliação dos aquíferos da bacia Sergipe/Alagoas entre Aracaju e Capela*. Recife: CTG/UFPE, 1998. 176p.
18. AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. *Abastecimento urbano de água: alternativas de oferta de água para as sedes municipais da Região Nordeste do Brasil e do Norte de Minas Gerais*. Brasília: ANA, 2006. 82p.
19. McDONALD, M. G.; HARBAUGH, A. W. *A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model*. Washington, Scientific Publications CO., 1984, 528 p.
20. ALLEN, R. G. et al. *Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements*. Rome: FAO, 1998. 300p. Irrigation and drainage paper 56.
21. PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDIYAMA, G. C. *Evapotranspiração*. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183p.
22. FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J. *Hidrogeologia: conceitos e aplicações*. 3 ed. Recife: CPRM, 2008. 391p.
23. MEDEIROS, R. M.; COSTA, O. A. Estimativa da evapotranspiração de referência mensal para os Estado de Sergipe. In: Simpósio Brasileiro de Climatologia Geográfica: Diversidades Climáticas, 6, 2004, Aracaju. *Anais...* Aracaju: UFS/ NPGeo, 2004, CD-Rom.
24. THORNTON, C. W. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, v. 38, n. 1, p. 55-94, 1948.