

Artigo Científico

## Estimativa de recarga das águas subterrâneas utilizando o método do balanço hídrico para o Sistema Aquífero Bauru em área de proteção de Cerrado

Thiago Ramires<sup>1</sup>  
Rodrigo Lilla Manzione<sup>2</sup>

### Resumo

O balanço hídrico agrometeorológico pode ser uma ferramenta eficiente na gestão de recursos hídricos e elaboração de planos de uso da água. Entretanto, as diferentes fontes de dados de precipitação e formas como elas são incluídas nas equações do balanço podem alterar os resultados de forma determinante. Nesse estudo foram estimadas recargas das águas subterrâneas no Sistema Aquífero Bauru em área de proteção de Cerrado em Águas de Santa Barbara/SP a partir de diferentes fontes de dados de precipitação obtidos por satélites de sensoriamento remoto, dados de radar meteorológico e estações climatológicas de superfícies. Esses dados foram integrados a dados de monitoramento hidrológico sistemático e classificação do uso e cobertura da terra em um modelo em ambiente de sistemas de informações geográficas. A análise espacial dos dados de balanço hídrico demonstrou que houve uma significativa recarga local das águas subterrâneas sendo o volume estimado em relação a precipitação variou de 20,43% com dados obtidos por Estação Climatológica Automática de superfície; 23,67% com dados de precipitação estimados pela Equação Z-R radar de Calheiros; e 35,54% com dados do satélite TRMM.

**Palavras-chave:** monitoramento, SIG, geotecnologias, precipitação.

### Groundwater recharge estimation using water budget method for Bauru Aquifer system in a Cerrado environmental protection area

#### Abstract

Agrometeorological water budget can be an efficient tool on water resources management and water use plans elaboration. However, different sources of precipitation data and how they are included in the water budget equations can significantly alter the results. In this study were estimated groundwater recharges at Bauru Aquifer System in a Cerrado protection area at Águas de Santa Barbara/SP-Brazil from different sources of precipitation data obtained by remote sensing satellites, meteorological radar and ground surface climate stations. These data were integrated with systematic hydrological monitoring data from 2014/2015 and land use cover classification data in a model in a geographical information system environment. The spatial analysis of water budget data demonstrate a significant local recharge in the study area, with the percentual volume from precipitation varying from 20.43% using ground surface climate station; 23.67% using precipitation data estimated by Z-R Calheiros radar equation; and 35.54% using TRMM satellite data.

**Keywords:** monitoring, GIS, geotechnologies, precipitation.

### Estimación de recuperación de agua subterránea utilizando el método de equilibrio hídrico para el sistema Aquífero Bauru en área de protección de Cerrado

#### Resumen

El balance hídrico agrometeorológico puede ser una herramienta eficiente en la gestión de los recursos hídricos y la elaboración de planes de uso del agua. Sin embargo, las diferentes fuentes de datos de precipitación y las formas en que se incluyen en las ecuaciones de equilibrio pueden cambiar los resultados

Received at: 12/11/2018

Accepted for publication at: 05/03/2019

1 - Bacharel em Geografia, Mestre em Agronomia (Irrigação e Drenagem), UNESP/FCA-Botucatu. e-mail: thiramires@gmail.com

2 - Engenheiro agrônomo, docente na UNESP - Campus de Ourinhos, Mestre em Agronomia. e-mail: lilla.manzione@unesp.br

de manera decisiva. En este estudio, se estimaron las recargas de agua subterránea en el Sistema del Acuífero Bauru en área de protección Cerrado en Águas de Santa Barbara /SP a partir de diferentes fuentes de datos de precipitación obtenidas por satélites de detección remota, datos de radar meteorológico y estaciones meteorológicas de superficie. Estos datos fueran integrados con datos sistemáticos de monitoreo hidrológico y clasificación de uso y cobertura del suelo en un modelo de sistemas de información geográfica. El análisis espacial de los datos del balance hídrico mostró una recarga local significativa de agua subterránea y el volumen estimado en relación con la precipitación varió del 20,43% con los datos obtenidos por la Estación Climatológica Automática de Superficie; 23,67% con datos de precipitación estimados por la Ecuación Z-R radar de Calheiros; y 35,54% con datos del satelital TRMM.

**Palabras clave:** monitoreo, SIG, geotecnología, precipitación.

## Introdução

A escassez hídrica que ocorreu no estado de São Paulo, ocasionada pela baixa pluviosidade no verão 2013/2014, e que foi recorde nos últimos 30 anos (COELHO et al., 2016), fez crescer a preocupação de pesquisadores, autoridades e sociedade civil com a disponibilidade dos recursos hídricos, visto que a água é um elemento vital ao ser humano e diversas atividades econômicas da humanidade. Estudos sobre o movimento da água exercem uma grande importância sobre questões econômicas, na agricultura, na produção de energia, nas atividades industriais e no abastecimento urbano. Um crescente interesse em torno dos parâmetros hídricos é identificado na conscientização das atividades humanas em relação ao meio ambiente. Períodos de estiagem e o desmatamento que ocorrem no país, tendem a impulsionar pesquisas científicas nessas áreas.

A representação científica do ciclo hidrológico é o balanço hídrico. Para estimar o balanço hídrico são necessárias as variáveis de precipitação e evapotranspiração potencial, sendo que as demais variáveis climáticas decorrem do próprio cálculo do balanço hídrico (TUBELIS, 2001). As formas de obtenção de dados de precipitação podem acontecer de duas formas distintas: medições locais de superfície e sensoriamento remoto. Dentre a primeira hipótese podemos citar as estações meteorológicas convencionais e automáticas, e na segunda, os sensores ativos, como os radares e os passivos, como os satélites. Rozante et al (2010) nota a importância das estimativas de sensores remotos para a precipitação em áreas com informações de campo esparsas, visto que o sensor remoto possui uma abrangência muito maior que os demais métodos.

O balanço hídrico agrometeorológico é uma

ferramenta importante no processo de tomada de decisão quanto ao uso da água e avaliação da capacidade das terras quanto à disponibilidade e demanda hídrica em sistemas agrícolas e florestais. O balanço hídrico, por sua vez, é um método climático de cálculo da água existente no solo e que está disponível para as plantas nas diferentes épocas do ano (TUCCI, 2007). Scanlon et al. (2002) e Healy (2010) esboçaram em seus trabalhos os atributos de diversas técnicas que vêm sendo utilizadas para quantificar a recarga, o primeiro artigo em questão se torna um expoente nos trabalhos relacionados a recarga. Segundo Wendland et al. (2007), a escolha de um método específico depende dos objetivos de trabalho e da precisão esperada nos resultados. Manzione (2014) reúne os métodos de estimativa de recarga mais utilizados na atualidade. Os métodos a partir do balanço hídrico podem ser divididos em três zonas: saturada, não saturada, e de água superficial, de acordo com a especificidade de cada método.

A principal fonte de entrada de água no ciclo hidrológico é a precipitação, visto que quando a água precipita, ela atinge a superfície e desencadeia uma série de processos. Parte dessa água que atingiu a superfície pode ser interceptada pelas plantas e evaporar antes de atingir o solo. A interceptação é um processo extremamente importante para a hidrologia pois trata-se de um processo evaporativo que resulta em perdas de água que de outra forma chegaria ao solo, ilustrando a importância dos fatores biológicos no ciclo da água, ou na hidrologia de uma bacia hidrográfica (LIMA, 1983). Segundo Tucci (2007), interceptação pode ocorrer devido a vegetação ou outra forma de obstrução ao escoamento. Outra parte da precipitação, ao atingir o solo, escoar de acordo com a declividade. A última parte pode infiltrar e percolar até o lençol freático, recarregando

os aquíferos, ou escoar subsuperficialmente. Assim, a recarga de águas subterrâneas em um aquífero pode ser entendida como a parcela de água que percola e atinge o nível freático do aquífero. Para que se compreenda os mecanismos de recarga das águas subterrâneas se faz necessário o estudo da precipitação incidente sobre as áreas de recarga dos sistemas aquíferos e das demais componentes do ciclo hidrológico. Nesse sentido, fontes de dados disponíveis em área total como os fornecidos por radares e satélites meteorológicos aparecem como alternativas interessantes para estimativas em bacias hidrográficas, por exemplo. Associando esses produtos a dados de superfície, é possível melhorar as predições e auxiliar no planejamento do uso de terras e tomadas de decisão quanto ao uso da água (VAREJÃO-SILVA, 2006). Existe uma boa acurácia no que tange a estimativa do satélite TRMM (*Tropical Rainforest Measurement Mission*), por exemplo, em relação aos dados de precipitação de estação pluviométrica, realizados através de análise de regressão linear e métodos estatísticos (FUZZO-SILVA et al., 2013; PEREIRA et al., 2013).

O objetivo desse trabalho foi realizar o balanço hídrico agrometeorológico em área do Sistema Aquífero Bauru a partir de dados de monitoramento e uso de geotecnologias com dados de entrada de precipitação em diferentes resoluções espaciais em uma área de proteção de Cerrado na Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Médio Paranapanema (UGRHI-17), no Estado de São Paulo.

## Materiais e métodos

### Áreas de estudo

A área de estudo (Figura 1) é a Estação Ecológica de Santa Bárbara (EEcSB), situada no município de Águas de Santa Bárbara, região sudoeste do estado de São Paulo. A estação é gerida pelo Instituto Florestal do Estado de São Paulo (IF), a unidade de conservação possui área de 2.712ha. Considerando o Sistema Integrado para a Gestão de Recursos Hídricos, a EEcSB pertence a Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos 17 (UGRHI-17), Médio Paranapanema.

Os biomas presentes na área são o Cerrado e a Mata Atlântica (Floresta Estacional Semidecidual). Na

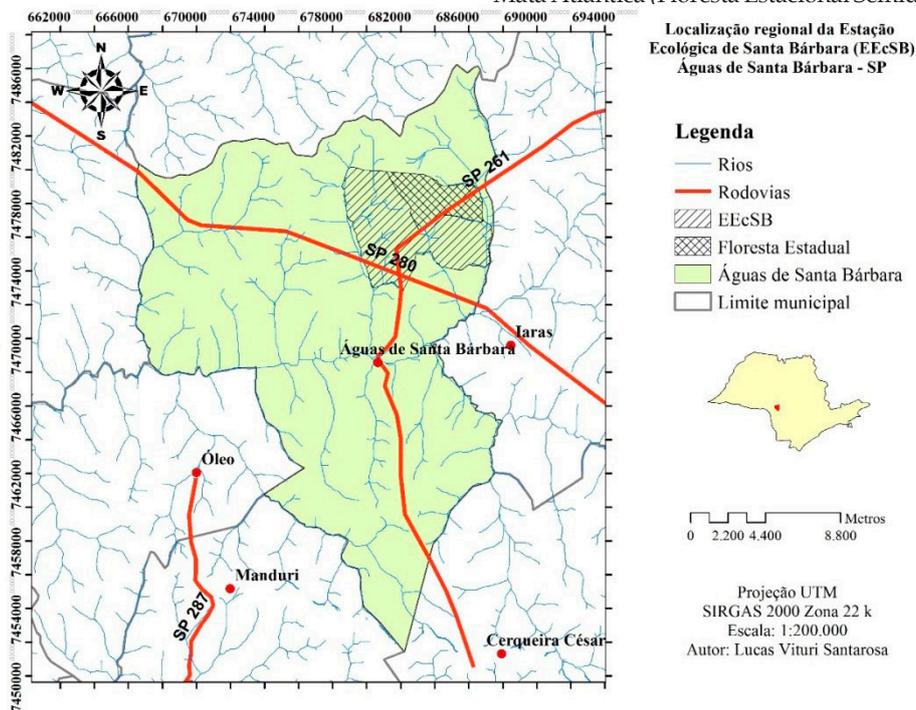


Figura 1. Localização da EEcSB e da Floresta Estadual nos limites do município de Águas de Santa Bárbara (SP).  
Fonte: SANTAROSA (2016).

mesma área, podem ser observados reflorestamentos comerciais (eucalipto e pinus) (MELO e DURIGAN, 2011). Seguindo a classificação de Köppen, o clima da região é Cwa (quente e úmido com inverno seco), apesar da sazonalidade da precipitação, as baixas temperaturas durante o período fazem com que haja baixa evapotranspiração, descrevendo ausência de déficit hídrico significativo, entretanto este cenário aliado aos solos muito arenosos, com baixa retenção de umidade, produz uma restrição hídrica condicionando a existência da vegetação de cerrado. (MELO e DURIGAN, 2011).

### Modelagem do balanço hídrico

Segundo Lucas (2012), os métodos de balanço hídrico são amplamente utilizados e a maioria dos métodos para estimar a recarga podem ser classificados como métodos de balanço hídrico, visto que a recarga é o resíduo de um balanço hídrico feito para um volume de controle, como por exemplo uma bacia hidrográfica. A partir de tal volume, o balanço hídrico pode ser obtido pela equação 1, proposta por Healy (2010):

$$D = P - ET - R_{off} - \Delta S \quad (1)$$

onde:  $P$  é precipitação,  $ET$  é evapotranspiração,  $R_{off}$  é o escoamento superficial,  $D$  é a drenagem profunda e  $\Delta S$  é a mudança no armazenamento.

### Dados disponíveis

Os dados utilizados nesse trabalho perfazem o período do ano hidrológico 2014/15, que vai de setembro a agosto (início da primavera até final do inverno). Para alguns componentes do ciclo hidrológico, os valores foram estimados de maneira espacial enquanto outros os valores foram fixos por não estarem disponíveis para área toda.

### Precipitação

A maior limitação do método do balanço hídrico que a acurácia dele depende da acurácia na medição dos outros componentes da equação. (SCANLON et al., 2002). Os dados podem ser medidos pontualmente em estações climatológicas, pluviógrafos e pluviômetros, ou espacializados a partir de sensoriamento remoto, como Radares e Satélites. Para este trabalho foram utilizados dados do satélite TRMM, do Radar Meteorológico localizado no município de Bauru operado e mantidos pelo Centro de Meteorologia de Bauru/UNESP e dados de uma Estação Climatológica Automática (ECA) instalada

na área de estudo.

O TRMM foi lançado em 1997 através de uma parceria entre a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) e a Agência Japonesa de Exploração Espacial (JAXA) com o objetivo de monitorar a precipitação na região tropical. Os dados do satélite são disponibilizados pelo *Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center* (GES DISC) na plataforma *Geospatial Interactive Online and Analysis Infrastructure* (GIOVANNI), no portal *TRMM Online Visualization and Analysis System* (TOVAS) (ACKER e LEPTOUKH, 2007). Nesse estudo foram utilizados os dados do TRMM de precipitação mensal acumulado do produto 3b43-v7.

Os dados de radar foram processados através do software TITAN (*Thunderstorm Identification, Tracking, Analysis and Nowcasting*) (DIXON e WIENER, 1993), em acumulado mensal. Foram processados através da aplicação "PrecipAccum.single" (acumulo de chuva diário) utilizando as equações Z-R de Calheiros (1982) e de Rosenfeld (1993). A aplicação "PrecipAccum.Totalmes" (acumulado do mês) utilizou as duas equações Z-R e foram processados a cada mês. Para exportar esse dado, foi utilizado a aplicação MDV2Ascii, que transforma o dado MDV em ASCII para o tratamento dos dados em SIG (Sistemas de Informação Geográfica). Também foram utilizados dados de precipitação diários medidos por uma Estação Climatológica Automática (ECA) de superfície localizada na EECSB.

### Evapotranspiração

A evapotranspiração de referência foi calculada pelo método de Penman-Monteith, padronizado pela ASCE (ALLEN et al., 2005) através dos dados diários acumulados da ECA localizada na EECSB (Equação 2).

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{C_n}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + C_d u_2)} \quad (2)$$

Em que:  $ET_0$ ; é a evapotranspiração de referência (mm dia<sup>-1</sup>);  $\Delta$ ; é a declividade da curva de pressão de vapor da água à temperatura do ar (kPa °C<sup>-1</sup>);  $R_n$ ; Radiação líquida calculada para a superfície (MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>);  $G$ ; Densidade do fluxo de calor do solo (MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>);  $C$ ; Constante;  $T$ ; Temperatura média do ar (Horária ou diária);  $u_2$ ; Velocidade média do vento a dois metros de altura (m s<sup>-1</sup>) (Horária ou diária);  $e_s$ ; Pressão de saturação do vapor de 1,5 a 2,5 metros

(kPa);  $e_a$ : Pressão de vapor atual de 1,5 a 2,5 metros (kPa); e  $\gamma$ : constante psicrométrica (kPa °C<sup>-1</sup>).

### Escoamento superficial

Safre e Manzione (2015) calcularam o Escoamento Superficial na EECSB através do Método do *Curve Number* (CN) desenvolvido pelo *Soil Conservation Service* (SCS) que determina o escoamento superficial gerado por eventos de precipitação, relacionado com as condições de superfície do solo. O método do SCS calcula o coeficiente de escoamento superficial direto a partir das características da cobertura superficial do terreno e das características físicas e umidade antecedente, dos diferentes tipos de solos encontrados em uma bacia hidrográfica (TUCCI, 2007) e também a partir da cobertura superficial do terreno. Para a área de estudo foi adotado um valor médio de 4% de escoamento superficial.

### Intercepção

Segundo Honda (2013), a intercepção é calculada pela precipitação (P) menos a Precipitação Interna (PI) e escoamento pelo tronco (ET). A água que chega em superfície é chamada de precipitação efetiva. O escoamento pelo tronco somente é viável para vegetação com tronco de magnitude razoável, representando uma pequena parcela do total precipitado (TUCCI, 2007). Para a intercepção foi criado um mapa de classificação de cultura com polígonos baseados no plano de manejo (MELO e DURIGAN, 2011) e imagem de satélite Landsat 7 de novembro de 2014. Para cada polígono de cultura foram gerados valores referentes de intercepção seguindo os parâmetros propostos por Honda (2013).

### Armazenamento de água no solo

O armazenamento de águas em bacias hidrográficas ocorre nos reservatórios em superfície, na zona saturada e não saturada (HEALY, 2010). O armazenamento subterrâneo é a quantidade de água até o nível freático ou zona de plano de fluxo (ZPF), sendo que nessa zona, parte da água se eleva através da ação da evapotranspiração, e a água que fica abaixo dessa zona, move-se lentamente em inúmeras direções, esta água é também considerada de armazenamento subterrâneo (USGS, 1998). O plano de informação de flutuação do nível freático foi gerado a partir dos dados de piezômetros e dados climatológicos coletados no período, utilizando o

programa *Hydrograph Analysis: Rainfall and Time Trend* (HARTT) conforme descrito em Silva e Manzione (2016). A partir das análises das hidrógrafas dos poços, estimou-se a amplitude da oscilação e multiplicou-se pela porosidade média do SAB para a região que é de aproximadamente 15%.

### Integração das informações em ambiente de Sistemas de Informações Geográficas

Os mapas criados para cada componente do Balanço Hídrico consistiram em colocar todos os dados em ambiente SIG, onde foi possível realizar a álgebra de mapas como descrito na equação 3:

$$M_f = M_p - M_{et} - M_I - M_{Roff} - M_{\Delta s} \quad (3)$$

onde:  $M_p$  é o mapa de precipitação,  $M_{et}$  é o mapa de evapotranspiração,  $M_I$  é o mapa de intercepção,  $M_{Roff}$  é o mapa de escoamento, e  $M_{\Delta s}$  é o mapa de variação do armazenamento subterrâneo.

De acordo com a modelagem proposta e adaptados os procedimentos propostos para análise residual do Balanço Hídrico proposto por Healy (2010), os dados espaciais foram organizados em camada espaciais para realizar a álgebra de mapas em ambiente SIG.

### Resultados e discussão

Utilizando dados de diferentes instrumentos e sensores, foram criados mapas de precipitação para cada um: Precipitação ECA, Precipitação Radar utilizando relação Z-R de Calheiros, Precipitação Radar utilizando relação Z-R de Rosenfeld e Precipitação TRMM.

O mapa de precipitação de ECA, utilizou um dado para toda a área, pois há apenas uma ECA na região analisada, ficando a precipitação acumulado de 1239,48 mm. A precipitação acumulada utilizando dados de Radar com a equação proposta por Calheiros (2014-2015) teve valor médio de 1300,40 mm, mínimo de 1215,86 mm e máximo de 1398,37 mm (Figura 2). O mapa de precipitação de Radar com a equação proposta por Rosenfeld (2014-2015) obteve o menor valor acumulado para o período, sendo de 806,03 mm a 951,11 mm e valor médio para área de 871,58 mm (Figura 3). O satélite TRMM devido a sua resolução espacial tem baixa variabilidade dos dados, sendo a precipitação mínima estimada de 1580,41 mm e a máxima de 1583,89 mm.

Assim, a Tabela 1 condensa os valores de precipitação encontrados nos mapas anteriores. Essa

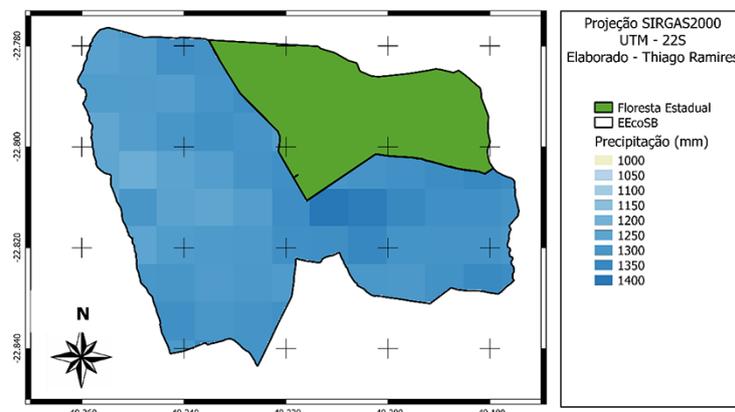


Figura 2. Precipitação na EEcoSB para o ano hidrológico 2014/15 utilizando dados de precipitação estimados pela equação radar Z-R de Calheiros.

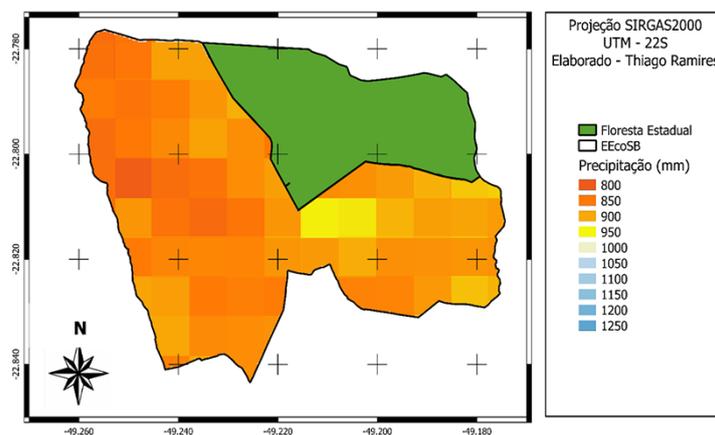


Figura 3. Precipitação na EEcoSB para o ano hidrológico 2014/15 utilizando dados de precipitação estimados pela equação radar Z-R de Rosenfeld.

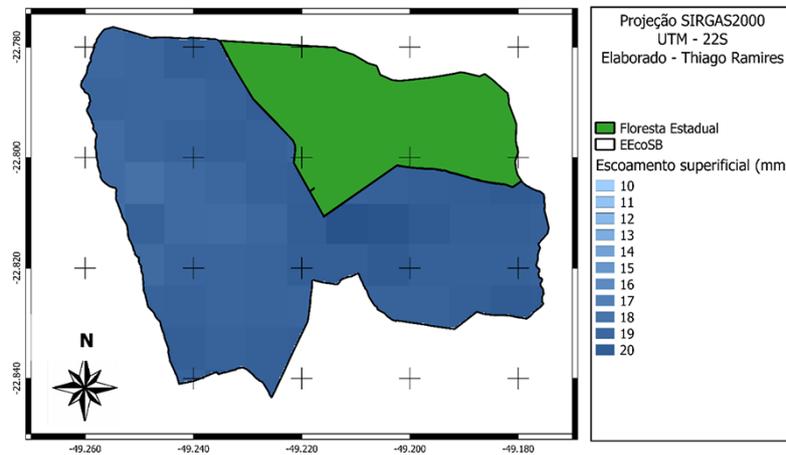
tabela ajuda a elucidar como a equação de Rosenfeld possui valores bem abaixo dos outros obtidos.

**Tabela 1.** Valores de Precipitação estimados por diferentes produtos para a área da EEcoSB no ano hidrológico 2014/15

Dados	Mínima	Média	Máxima	Desvio Padrão
Calheiros	1215,90	1300,40	1398,40	33,50
Rosenfeld	806,00	871,60	951,10	27,80
TRMM	1580,40	1580,70	1583,90	1,00
EEcoSB	-	1239,50	-	-

Os mapas de escoamento superficial tiveram uma variação de 5 mm a 25 mm. O mapa de escoamento superficial baseado na precipitação do TRMM e da ECA devido as suas resoluções espaciais tiveram como resultado um mapa homogêneo para toda a área. Os mapas de escoamento superficial a partir do radar pelas equações de Calheiros (Figura 4) e Rosenfeld, demonstraram por sua vez diferença de valores devido a sua resolução espacial, este resultado é importante para demonstrar espacialmente o fenômeno retratado, fornecendo um dado do escoamento para a área.

Os mapas de interceptação foram gerados a partir do mapa de uso e ocupação do solo, que por sua vez, trazem um nível de detalhamento muito grande, e os dados para as multiplicações dos fatores por

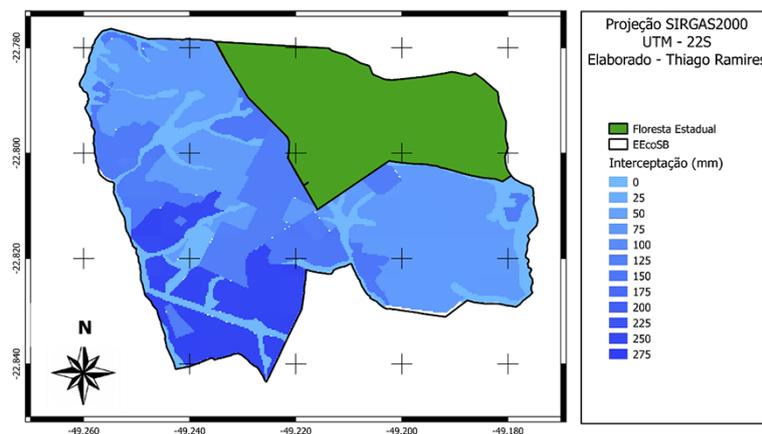


**Figura 4.** Escoamento superficial na EECSB para o ano hidrológico 2014/15 utilizando dados de precipitação estimados pela equação radar Z-R de Calheiros.

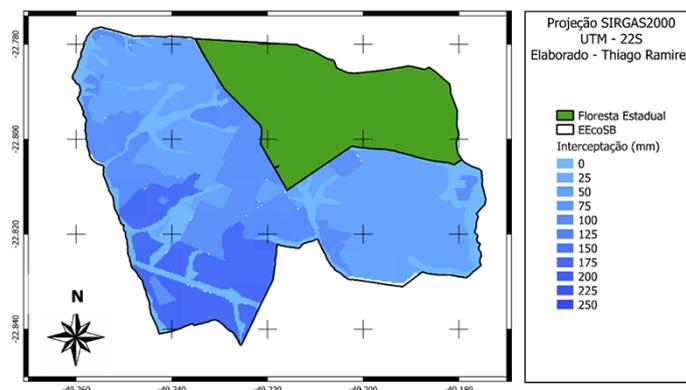
pixel foram extraídos dos trabalhos de Honda (2013). A Figura 5 demonstra os dados de interceptação a partir dos dados de radar provenientes da equação de Calheiros e a Figura 6, a partir da equação de Rosenfeld.

O mapa de Variação do Armazenamento Subterrâneo e Evapotranspiração apresentaram

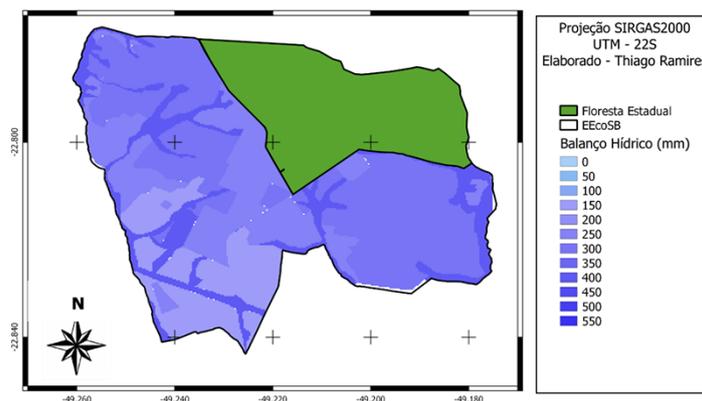
apenas um valor para toda a área de 103,67mm e 763,88mm, respectivamente. Os mapas foram gerados para que seja realizada a álgebra de mapas, variação do armazenamento subterrâneo e evapotranspiração. Com os mapas anteriores foi possível estimar a recarga para o aquífero no biênio de estudo em diversos cenários. A Figura 7 demonstra a estimativa para



**Figura 5.** Interceptação pela vegetação na EECSB para o ano hidrológico 2014/15 utilizando dados de precipitação estimados pela equação radar Z-R de Calheiros.



**Figura 6.** Intercepção pela vegetação na EECSB para o ano hidrológico 2014/15 utilizando dados de precipitação estimados pela equação radar Z-R de Rosenfeld.



**Figura 7.** Balanço hídrico na EECSB para o ano hidrológico 2014/15 utilizando dados de precipitação observados pela Estação Climatológica Automática (ECA) de superfície.

os dados de recarga, que por sua vez é o resíduo da equação calculada, a partir da precipitação obtida na ECA. Já, a Figura 8 mostra o mesmo fenômeno a partir da precipitação obtida pelo radar, com a equação de Calheiros, enquanto a equação de Rosenfeld é demonstrada na Figura 9. Por fim, é apresentado um mapa para a estimativa da recarga a partir dos dados de precipitação a partir dos dados do TRMM (Figura 10).

Pode-se analisar com os mapas gerados que o resíduo do balanço hídrico, aqui no trabalho considerado como recarga, fica entre -218,52 e 692,57 mm. Sendo

-218,52 mm o valor mínimo encontrado utilizando os dados de precipitação de Radar (Z-R Rosenfeld) e valor máximo de 692,57 mm com os dados de TRMM.

Os valores médios de cada Balanço hídrico (Tabela 2) foram de -79,12 mm e 561,82 mm novamente entre os dados de Radar (Z-R Rosenfeld) e TRMM. Para a EMA e Radar (Z-R Calheiros) os valores foram de 253,23 mm e 308,79 mm respectivamente. Esse resultado corresponde a recarga de 20,43% da precipitação para EMA, 23,67% Z-R Calheiros, -9,21% Z-R Rosenfeld e 35,54% para TRMM.

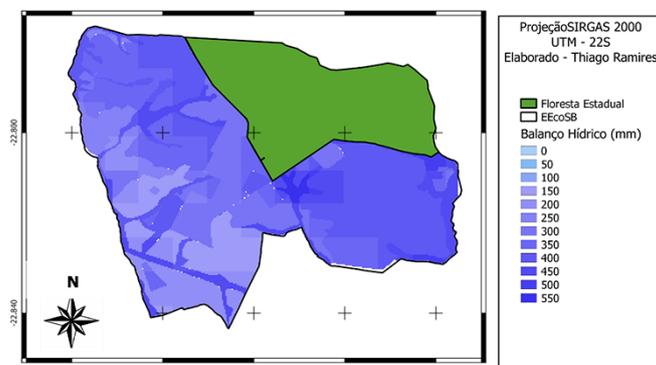


Figura 8. Balanço Hídrico na EECSB para o ano hidrológico 2014/15 utilizando dados de precipitação estimados pela equação radar Z-R de Calheiros.

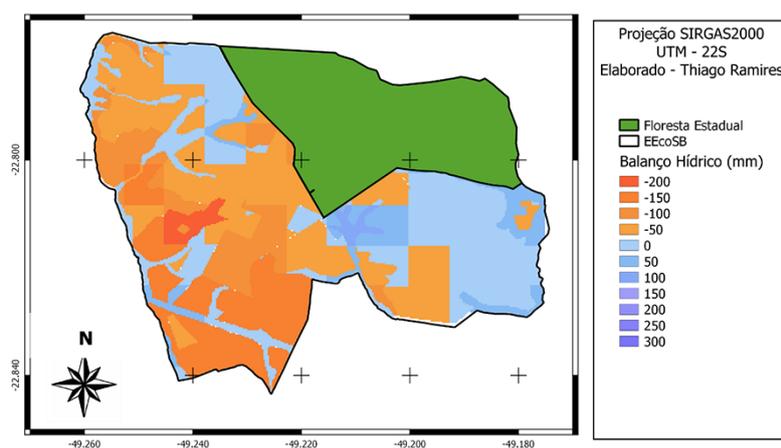
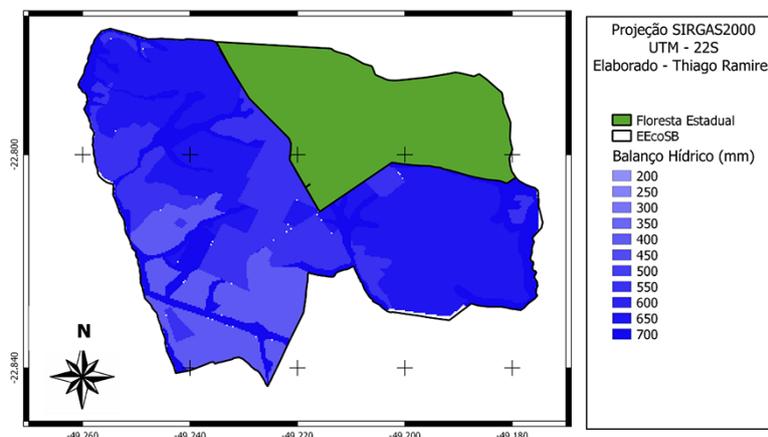


Figura 9. Balanço Hídrico na EECSB para o ano hidrológico 2014/15 utilizando dados de precipitação estimados pela equação radar Z-R de Rosenfeld.

Tabela 2. Valores de Balanço Hídrico na EECSB no ano hidrológico 2014-2015

Dados	Mínima	Média	Máxima	Desvio Padrão
EECSB	105,44	253,23	353,33	78,36
Calheiros	109,71	308,79	509,84	92,32
Rosenfeld	-218,52	-79,12	69,29	64,36
TRMM	373,07	561,82	692,57	100,00



**Figura 10.** Balanço Hídrico na EECsB para o ano hidrológico 2014/15 utilizando dados de precipitação estimados pelo satélite TRMM.

Quando esses valores são comparados com os valores de precipitação obtidos, é obtido os valores da porcentagem da precipitação (Tabela 3) que se torna resíduo, ou seja, a parte da chuva que se torna recarga para o aquífero.

**Tabela 3.** Valores de recarga/precipitação na EECsB no ano hidrológico 2014-2015 (%)

Dados	Mínima	Média	Máxima	Desvio Padrão
ECA	8,5	20,43	28,5	6,32
Calheiros	8,81	23,67	36,45	6,82
Rosenfeld	-26,43	-9,21	7,28	7,51
TRMM	23,6	35,54	43,72	6,32

Quando os valores de precipitação e recarga obtidos na área são multiplicados pela área da estação é obtida a quantidade em m<sup>3</sup> que precipitou e que foi armazenada em subsuperfície (Tabela 4).

Quando observada a tabela 4, nota-se que os valores obtidos para o resíduo do balanço hídrico ficam entre -9% a 35%. Removendo-se os valores negativos da equação de Rosenfeld, pode-se dizer que o alcance do resíduo é de 20 a 35%, quando na literatura pode-se destacar Barreto (2005), que encontrou valores de recarga direta de 400,00 mm correspondendo em 29% da precipitação anual. Já, Gomes (2008) para a mesma área encontrou valores de recarga direta de 14 a 38%. Santos (2012) encontrou valores de 21,8 e 34,6% em relação a precipitação do ano hidrológico 2008-

**Tabela 4.** Valores para precipitação e recarga calculados para a EECsB no ano agrometeorológico de 2014-2015.

Dados	Precipitação média (mm)	Precipitação total na área (m <sup>3</sup> )	Balanço Hídrico total área (m <sup>3</sup> )	Balanço Hídrico média (mm)	Balanço Hídrico média (%)
ECA	1239,48	40.538.893,56	8.282.234,50	253,23	20,43
Calheiros	1300,40	42.531.365,73	10.099.400,51	308,79	23,67
Rosenfeld	871,58	28.506.284,84	-2.587.728,12	-79,12	-9,21
TRMM	1580,74	51.700.269,96	18.375.093,73	561,82	35,54

2009, utilizando modelagem numérica e modelagem hidrológica, respectivamente para área de cerrado. Ressaltando o fato de que resultado (resíduo) leva em consideração toda a água infiltrada, ou seja, a recarga e o fluxo subterrâneo, pode-se ressaltar o trabalho de

Lucas (2012) que encontrou valores de recarga de 7% em ano seco 2004/2005 e de 20% para período mais chuvoso 2010 -2011.

Esses valores mostram que mesmo após um ano seco como o de 2013/2014, os níveis freáticos

pueram se recuperar e reabastecer o aquífero na área de estudo. A precipitação média para Águas de Santa Barbara segundo o Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura (CEPAGRI) foi 1353,7 mm, a precipitação ficou abaixo da média, com exceção do TRMM, para o próximo ano hidrológico a recarga pode ocorrer uma recuperação maior do aquífero.

Para trabalhos futuros recomenda-se analisar uma forma de fusão dos dados das estações e do satélite, criando uma complementaridade entre ambos, assim como no trabalho de Rozante et al. (2010). Tal associação poderia corrigir dados ausentes ou com problemas em suas medições.

## Conclusões

O presente trabalho propôs-se a avaliar produtos que auxiliem na estimativa de componentes

do ciclo hidrológico para cálculo da recarga das águas subterrâneas em área de conservação. Para esse estudo o método de Rosenfeld não é recomendado pois subestimou em 30% a precipitação.

O ambiente SIG mostrou-se eficiente para a análise espacial dos dados de balanço hídrico, e pode ser trabalhado futuramente com outras proposições de modelagem de balanço hídrico. Outras equações de balanço hídrico também podem ser testadas, levando em conta mais variáveis.

De maneira geral, houve uma significativa recarga local das águas subterrâneas. A recarga média estimada foi da ordem de 253,23 mm (ECA), 308,79 mm (Calheiros) e 561,82 mm TRMM. Quanto ao particionamento da recarga, os valores corresponderam a 20,43% (ECA), 23,67% (Calheiros) e 35,54% (TRMM).

## Referências

- ACKER, J. G.; LEPTOUKH, G. Online Analysis Enhances Use of NASA Earth Science Data. *Eos, Trans. AGU*, v. 1.88, p. 14-17, 2007.
- ALLEN, R. G.; WALTER, I. A.; ELLIOTT, R. L.; HOWELL, T. A.; ITENFISU, D.; JENSEN, M. (Eds.) **ASCE Standardized Reference Evapotranspiration Equation**. Task Committee on Standardization of Reference Evapotranspiration - Environmental and Water Resources Institute of the American Society of Civil Engineers, 2005. 59 p. doi: 10.1061/40499(2000)126
- BARRETO, C. E. A. G. **Balanço hídrico em zona de afloramento do Sistema Aquífero guarani a partir do monitoramento hidrogeológico**. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2005. 249 p.
- CALLEGARI-JACQUES, S. M. **Bioestatística: princípios e aplicações**. Porto Alegre: Artemed, 2003. 255 p.
- CALHEIROS, R. V. **Resolução espacial de estimativas de precipitação com radar hidrometeorológico**. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1982.
- COELHO, C. A. S., CARDOSO, D. H. F.; FIRPO, M. A. F. Precipitation diagnostics of an exceptionally dry event in São Paulo, Brazil. *Theor. Appl. Climatol.*, v. 125, p. 769 - 784, 2006. doi: 10.1007/s00704-015-1540-9
- DIXON, M.; WIENER, G. TITAN: Thunderstorm Identification, Tracking, Analysis & Nowcasting - A radar-based methodology. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, v. 10, p.785-797, 1993
- FUZZO-SILVA, D. F.; PRELA, A.; CAMARGO, M. B. P. Análise de dados de precipitação estimados pelo satélite TRMM para o vale do Médio Paranapanema SP. *Revista Engenharia na Agricultura*, v. 21, p.138-147, 2013.
- GODDARD EARTH SCIENCES DATA AND INFORMATION SERVICES CENTER (GES DISC). Disponível em: <http://disc.gsfc.nasa.gov/precipitation/tovas>. Acesso em 20 nov. 2015.
- GOMES, A. M. **Tópicos em Meteorologia com Radar**. Bauru: IPMET, 1993.
- HEALY, R. W.; COOK, P. G., Using groundwater levels to estimate recharge. *Hydrogeology Journal*, v. 10, p. 91-109, 2002.
- HEALY, R. W. **Estimating groundwater recharge**. Cambridge: Cambridge University Press, 2010. 245 p.
- HONDA, E. A. **Repartição da água da chuva sob o dossel e umidade do solo no gradiente fisionômico da vegetação do Cerrado**. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2013. 145 p.
- LIMA, W. P.; NICOLIELO, N. Precipitação efetiva e intercepção em florestas de pinheiros tropicais e em reserva de cerrado, *IPEF*, n. 24, p. 43 - 63, 1983.

- MANZIONE, R. L.; TANIKAWA, D. H.; SOLDERA, B. C.; Relação entre a resposta espectral da vegetação em diferentes cultivos agrícolas e níveis freáticos em área de recarga do Sistema Aquífero Guarani, **Águas Subterrâneas**, v. 28, p. 1-13, 2014.
- MELO, A. C. G.; DURIGAN, G. **Plano de manejo da Estação Ecológica de Santa Bárbara**. São Paulo: Instituto Florestal, 2011. 222 p.
- PEREIRA, G.; SILVA, M. E. S.; MORAES, E. C.; CARDOZO, F. S. Análise dos dados de precipitação estimados pelo satélite TRMM para o Brasil. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, p. 139 - 148, 2013.
- ROSENFELD, D.; WOLFF, D. B.; ATLAS, D. General probability-matched relations between radar reflectivity and rain rate. **Journal of applied meteorology**, v. 32, n 1, p. 50-72, 1993.
- ROZANTE, J. R.; MOREIRA, D. S.; GONÇALVES, L. G. G.; VILA, D. A. Combining TRMM and Surface Observations of Precipitation: Technique and Validation over South America. *Weather and Forecasting*, v. 25, p. 885 - 894, 2010.
- SAFRE, A. L. S.; MANZIONE, R. L. Avaliação do escoamento superficial gerado por eventos de precipitação na bacia do ribeirão do Bugre, Águas de Santa Bárbara. In: **Congresso de Iniciação Científica da UNESP**, 27, p. 1, 2015.
- SANTOS M. M.; CHANG M. R. C.; KIANG C. H. Geotecnologia aplicada na avaliação do uso das águas subterrâneas em municípios da porção centro-oeste do estado de São Paulo. In: **Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas**, 17, p. 1 - 4, 2012.
- SCANLON, B. R.; HEALY, R. W.; COOK, P. G. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. **Hydrogeology Journal**, v. 10, p. 18-39, 2002.
- SILVA, R. C. F.; MANZIONE, R. L. Aplicação do modelo HARTT no estudo das oscilações dos níveis freáticos do Sistema Aquífero Bauru (SAB) sob vegetação de Cerrado. **Águas Subterrâneas**, v. 30, p. 362-374, 2016.
- TUBELIS, A. **Conhecimentos práticos sobre clima e irrigação**. Viçosa: Ed. Aprenda Fácil, 2001. 114 p.
- TUCCI, C. E. M. (Org). **Hidrologia: ciência e aplicação**. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 2007. 943 p.
- VAREJÃO-SILVA, M. A. **Meteorologia e Climatologia**. Versão digital 2. Recife: Mario Adelmo Varejão-Silva, 2006. 449 p.