

## Estimativas da Recarga do Sistema Aquífero Bauru em uma Microbacia no Entorno da Cidade de Uberaba – MG

*Estimates of Recharge of Bauru Aquifer System in a Watershed Surrounding the City of Uberaba – MG*

José Cláudio Viégas Campos<sup>1</sup> , Didier Gastmans<sup>2</sup> , Lucas Vituri Santarosa<sup>3</sup> ,  
Isabela Oliveira Lopes<sup>1</sup> , Mariana Correa Pessato Alves<sup>1</sup> , Leticia Ferreira Martins<sup>1</sup>   
& Adelar José Fabian<sup>4</sup> 

<sup>1</sup> Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Instituto de Ciências Tecnológicas e Exatas, Departamento de Engenharia Ambiental. Uberaba, MG, Brasil

<sup>2</sup> Universidade Estadual Paulista; Centro de Estudos Ambientais. Rio Claro, SP, Brasil

<sup>3</sup> Universidad Tecnológica del Uruguay, Ingeniería Agroambiental. Durazno, Departamento de Durazno, Uruguay

<sup>4</sup> Instituto Federal do Triângulo Mineiro, Curso de Engenharia Agrônômica. Uberaba, MG, Brasil

E-mails: [jose.campos@uftm.edu.br](mailto:jose.campos@uftm.edu.br); [didier.gastmans@unesp.br](mailto:didier.gastmans@unesp.br); [lucas.vituri@utec.edu.br](mailto:lucas.vituri@utec.edu.br); [isa\\_olilopes@hotmail.com](mailto:isa_olilopes@hotmail.com); [mariana\\_cpalves@hotmail.com](mailto:mariana_cpalves@hotmail.com); [leticiamartins97@gmail.com](mailto:leticiamartins97@gmail.com); [adelar@iftm.edu.br](mailto:adelar@iftm.edu.br)

### Resumo

O Sistema Aquífero Bauru (SAB) é um aquífero predominantemente livre, com grande extensão territorial, abrangendo parte dos estados de Minas Gerais, São Paulo, Paraná, Goiás e Mato Grosso do Sul. Na região do Triângulo Mineiro, embora pouco estudado, o SAB possui importante papel no atendimento total ou parcial às demandas de abastecimento público de água de diversas cidades, além de contribuir na manutenção das vazões dos rios na época da estiagem. Um dos principais parâmetros a ser avaliado para a gestão de uma unidade aquífera é sua taxa de recarga, e nesse sentido, o presente trabalho apresenta estimativas de recarga no SAB, para o período de agosto de 2016 a julho de 2019, em uma microbacia com área de 1,4 km<sup>2</sup>, no entorno da cidade de Uberaba. Foram empregados três métodos para determinação da recarga: o método de Balanço Hídrico Climático (BHC) baseado em dados de precipitação e evapotranspiração real fornecidos pela estação meteorológica local, o método de Variação de Nível d'Água (VNA) utilizando dados de 11 piezômetros na área de estudo e o método apoiado em dados de sensoriamento remoto do sistema de satélites do *Gravity Recovery and Climate Experiment* (GRACE). O método BHC indicou para o período de estudo uma recarga potencial média anual de 902 mm e o método com dados do GRACE indicou uma recarga média anual de 517 mm. A recarga potencial calculada pelo método BHC foi utilizada como referência para determinação do valor máximo admissível para o coeficiente de armazenamento a ser utilizado no método VNA. Para o método VNA, adotou-se uma faixa de coeficiente de armazenamento para o SAB de 0,05 a 0,09, os valores médios da recarga anual variaram de 302 a 541 mm. Embora os estudos de avaliação de recursos hídricos subterrâneos utilizando dados do GRACE sejam normalmente aplicados em escalas globais/regionais, os valores obtidos de recarga média anual foram convergentes com o método VNA.

**Palavras-chave:** Recarga; Águas subterrâneas; GRACE

### Abstract

The Bauru Aquifer System (*Sistema Aquífero Bauru - SAB*) is a predominantly phreatic aquifer, with a large territorial extension, covering part of the states of Minas Gerais, São Paulo, Paraná, Goiás and Mato Grosso do Sul. In the region of the Triângulo Mineiro, although little studied, the SAB plays an important role in fully or partially meeting the demands for public water supply in several cities, in addition to contributing to the maintenance of river flows during the dry season. One of the main parameters to be evaluated for the management of an aquifer unit is its recharge rate, and in this sense, this paper presents estimates of recharge in the SAB, for the period from August 2016 to July 2019, in a watershed with 1.4 km<sup>2</sup> area, around the city of Uberaba. Three methods were used to determine the recharge: The Climatic Water Balance (CWB) method based on precipitation and actual evapotranspiration data provided by the local weather station, the Water Table Fluctuation (WTF) method using 11 piezometer data on study area and the method supported by remote sensing data from the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) satellite system. The CWB method indicated a potential annual average recharge of 902 mm for the study period and the method with GRACE data indicated an average annual recharge of 517 mm. The potential recharge calculated by the CWB method was used as a reference to determine the maximum allowable value for the specific yield to be used in the WTF method. For the WTF method, a range of specific yield for the SAB was adopted from 0.05 to 0.09, the average values of the annual recharge varied from 302 to 541 mm. Although studies on the assessment of groundwater resources using GRACE data are normally applied on global/regional scales, the values obtained from average annual recharge were convergent with the WTF method.

**Keywords:** Recharge; Groundwater; GRACE

## 1 Introdução

A demanda por água no mundo vem aumentando a uma taxa de 1% ao ano desde 1980, pressionada pelo crescimento populacional, socioeconômico e mudanças no hábito de consumo da população (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization 2019). Neste contexto, a água subterrânea se reveste de grande importância uma vez que constitui a principal fonte de água doce no planeta acessível à população (Abbott et al. 2019).

A determinação das taxas de recarga em um aquífero, bem como suas variações espaço-temporal, representa uma importante informação para a gestão eficiente dos recursos hídricos e sua avaliação pode apontar para efeitos relacionados a mudanças do uso do solo e/ou a alterações climáticas. Entende-se por recarga das águas subterrâneas quando o fluxo de água descendente atravessa a zona vadosa e alcança a zona saturada (Healy 2010).

Os estudos sobre recarga das águas subterrâneas tiveram um incremento enorme a partir de meados da década de 1980 (De Vries & Simmers 2002) e a aplicação de múltiplos métodos é aconselhável no cálculo da recarga, uma vez que há limitações inerentes a cada método (Healy & Cook 2002; Scanlon, Healy & Cook 2002).

As metodologias para cálculo da recarga podem ser divididas de acordo com a origem das informações, que podem ser provenientes da água superficial, da zona saturada ou da zona não saturada. Entretanto, as técnicas que se utilizam de informações de águas superficiais ou da zona não saturada fornecem o que seria uma recarga potencial, enquanto as técnicas que se utilizam de dados da zona saturada representam a recarga real (Scanlon, Healy & Cook 2002; Delin & Risser 2007). Existe uma diversidade de métodos para uma ampla gama de situações. Os métodos podem se basear: (i) nas medições da oscilação do nível freático, (ii) na utilização de traçadores químicos, (iii) nos componentes hidrológicos, tais como o fluxo de base e balanço hídrico, (iv) em sensoriamento remoto e (v) em modelagem numérica (Healy 2010). As taxas de recargas tendem a ser controladas pelo clima, vegetação, topografia e geologia e em regiões de clima úmido, os aquíferos são caracterizados por nível freático pouco profundo e a presença de rios efluentes (Scanlon, Healy & Cook 2002). Nessas condições, há a predominância de utilização de dados de vazão dos rios com o método de decomposição de hidrograma, utilização do método de variação do nível d'água em poços de observação e balanço hídrico em bacias hidrográficas (Islam et al. 2015).

O Sistema Aquífero Bauru (SAB) é um dos principais aquíferos do Brasil, com grande extensão territorial, entretanto, é muito pouco estudado na região do Triângulo Mineiro, sua área de ocorrência em Minas

Gerais, com destaque para os trabalhos de Oliveira e Campos (2004); Batezelli et al. (2005); Velásquez et al. (2008), dentre outros. O SAB é um importante aquífero intergranular na região do Triângulo Mineiro, onde suas águas subterrâneas desempenham uma importante função estratégica na manutenção das vazões das drenagens na época de estiagem, exatamente devido ao fato de ser um aquífero livre, que lhe confere conexão hidráulica com os rios da região (Bertol et al. 2006).

De modo a contribuir para minimizar essa lacuna no conhecimento hidrogeológico desse importante aquífero, o estudo teve como objetivo calcular a taxa de recarga das águas subterrâneas no SAB, em uma microbacia localizada na Área de Proteção Ambiental da bacia do rio Uberaba. A escolha da área de estudo se faz de extrema relevância uma vez que está inserida na porção jusante da APA, mesma bacia onde se localiza o ponto de extração de água que é utilizada como principal fonte de abastecimento público da cidade de Uberaba (Cândido et al. 2010).

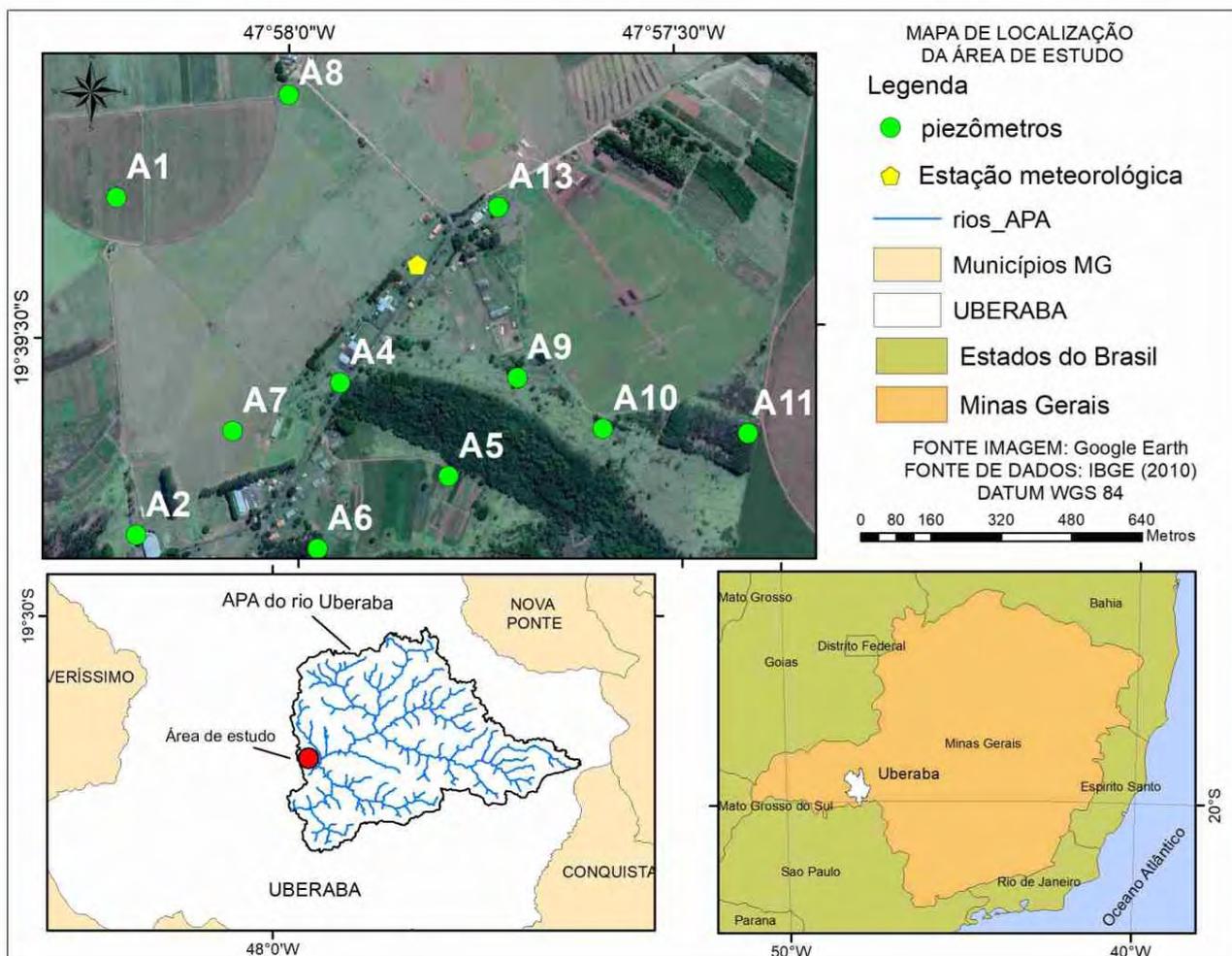
Para o presente estudo foram selecionados três métodos para determinação da recarga das águas subterrâneas no SAB: o método de Variação do Nível d'Água (VNA), o Balanço Hídrico Climático (BHC) e o método que utiliza dados da variável armazenamento da água subterrânea (*GroundWater Storage - GWS*) dos satélites *Gravity Recovery and Climate Experiment* (GRACE). Os valores de recarga obtidos foram comparados entre si e foi avaliado o potencial de determinação da recarga para estudos em pequena escala pelo método GRACE.

A aplicação desses três métodos para determinação de recarga das águas subterrâneas na área em estudo visa responder alguns questionamentos: qual a taxa de recarga média anual para o SAB localmente? A velocidade de resposta à recarga é igual em toda a bacia? Qual o período de recarga da área? É possível utilizar os dados dos satélites GRACE para calcular a recarga das águas subterrâneas em estudos locais?

## 2 Caracterização da Área

O estudo foi desenvolvido em uma microbacia experimental (Figura 1) com área aproximada de 1,4 Km<sup>2</sup>, altitude variando de 770 metros a 818 metros, localizada no Campus do Instituto Federal do Triângulo Mineiro (IFTM), Uberaba, Minas Gerais, dentro da Área de Proteção Ambiental do rio Uberaba (APA).

A APA do rio Uberaba se encontra bastante impactada pelas atividades antrópicas, sendo que 53% de sua área é coberta por pastagens, 11% por agricultura, possuindo somente 33% de cobertura natural (Martins 2020). Assim como na APA do rio Uberaba, a área de estudo é ocupada em 60% por atividades de lavoura e pastagem (Torres & Fabian 2006).



**Figura 1** Mapa de localização da área de estudo com indicação dos piezômetros na Área de Proteção Ambiental (APA) do rio Uberaba – MG.

A região possui um clima tropical seco com períodos chuvosos de outubro a março e secos de abril a setembro (Novais, Brito & Sanches 2018). A precipitação média anual para o período de 1989 a 2017 foi de 1633 mm, de acordo com dados da estação pluviométrica em Uberaba (83577) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), com uma temperatura média anual de 22,5°C.

O arcabouço hidrogeológico da área é representado pelo SAB que é um aquífero sedimentar com ocorrência nos estados de São Paulo, Minas Gerais, Paraná, Mato Grosso do Sul e Goiás, cobrindo uma área de aproximadamente 330.000 km<sup>2</sup> (Batezalli et al. 2005). No estado de Minas Gerais, ele ocorre na região denominada Triângulo Mineiro, tendo como base os basaltos da Fm. Serra Geral. É constituído por rochas das formações Marília, Uberaba e Vale do rio do Peixe pertencentes ao Grupo Bauru e por rochas da Formação Santo Anastácio, que ocorrem em pequenas porções no extremo oeste do Triângulo Mineiro, que são

pertencentes ao Grupo Caiuá. De modo geral, a Formação Marília é constituída por arenitos com intercalações de lamitos arenosos; a Formação Uberaba é formada por arenitos, conglomerados e pelito e a Formação Vale do Rio do Peixe é constituída de arenitos eólicos e apresenta a maior extensão superficial. A Formação Santo Anastácio, pertencente ao Grupo Caiuá, é também representada por arenitos eólicos (Serviço Geológico do Brasil 2012a).

Devido às características geológicas do SAB em Minas Gerais, com intensa cimentação carbonática, as vazões de produção tendem a ser baixas, sendo seus poços somente utilizados para suprir pequenas demandas de até 20 m<sup>3</sup>/h. No Triângulo Mineiro, a espessura dessa unidade pode chegar a 180 metros na região de Iturama, com espessuras médias de 30 a 40 metros (Batezalli et al. 2005).

O Grupo Bauru, na área de estudo, é representado exclusivamente pela Formação Uberaba que é constituída por arenitos silto argilosos com cimentação calcífera,

com baixa condutividade hidráulica e baixa porosidade, conforme observado na baixa produtividade dos poços da área urbana de Uberaba (Silva & Campos 2018).

Na cidade de Uberaba, a profundidade dos poços pode chegar a 85 m para o SAB, com uma média de 39 m. As vazões específicas variaram de 0,3 a 1,1 m<sup>3</sup>/h/m para uma vazão média de produção de 4,6 m<sup>3</sup>/h (Silva & Campos 2018). Embora os poucos estudos desenvolvidos na porção mineira do SAB indiquem um coeficiente de armazenamento na faixa de 0,12 (Oliveira & Campos 2004; Fiumari 2004), trabalhos desenvolvidos pelo Departamento de Água e Energia Elétrica (DAEE) em São Paulo indicam porções do SAB com valores na faixa de 0,05, exatamente na porção noroeste de São Paulo, nas proximidades da divisa com Minas Gerais, próximo ao Triângulo Mineiro (Rocha 2005). Isto implica em uma maior variabilidade deste parâmetro para esta unidade aquífera na região.

### 3 Materiais e Métodos

O cálculo da recarga das águas subterrâneas foi baseado nos dados de precipitação e evapotranspiração real obtidos pela estação meteorológica local, na observação da variação do nível d'água dos 11 piezômetros localizados na área de estudo e nos dados de sensoriamento remoto da variável GWS dos satélites GRACE.

#### 3.1 Método do Balanço Hídrico Climático (BHC)

O cálculo da recarga das águas subterrâneas pelo método do Balanço Hídrico Climático (BHC) é uma técnica bastante utilizada com aplicabilidade para diversas escalas espaciais e temporais (Scanlon, Healy & Cook 2002). Em uma bacia hidrográfica, o BHC consiste em um balanço de massa que a considera um sistema fechado onde o aporte de água no sistema se dá pela precipitação pluviométrica e a saída é o exutório, com perdas intermediárias relacionadas à evapotranspiração e infiltração profunda (Tucci 2004). Entretanto, a maior limitação deste método está relacionada à eficiência na aquisição dos parâmetros que compõem a equação do balanço de massa. Simplificadamente, este balanço pode ser expresso pela seguinte expressão:

$$P = ETR + ES + I \rightarrow P = ETR + EH \quad (1)$$

Onde, P representa a precipitação, ETR a evapotranspiração real, ES o escoamento superficial, I é a infiltração e EH constitui o excedente hídrico.

Dados pluviométricos foram obtidos da estação meteorológica modelo Davis Vantage, localizada na área de estudo (Figura 1), pertencente ao Núcleo de Estudos de Culturas Irrigadas (NECI). A estação meteorológica

também forneceu os dados de Evapotranspiração Real calculados automaticamente pelo método de Penman Monteith (Misstear, Brown & Johnston 2009). Ambas as informações são fornecidas de 30 em 30 minutos e cobrem o período de estudo.

Analisando-se a Equação (1), pode-se considerar que a recarga máxima possível, ou também definida como recarga potencial (Healy 2010), ocorrerá quando não houver escoamento superficial e todo excedente hídrico compor a infiltração.

Com base nesse princípio, a recarga potencial será calculada para o período de agosto de 2016 a julho de 2019, período definido para o projeto, sendo que será dividida em intervalos para facilitar a análise. O intervalo de agosto de 2016 a julho de 2017 foi definido como Período 1, agosto de 2017 a julho de 2018 como Período 2 e agosto de 2018 a julho de 2019 como Período 3. Dessa forma, a recarga potencial será calculada para cada período e servirá como referência para balizar a recarga calculada pelo método VNA, através da seleção de valores adequados de coeficiente de armazenamento que gerem valores de recarga inferiores à recarga potencial.

#### 3.2 Método da Variação do Nível d'Água (VNA)

Na área encontram-se instalados, desde 2003, 11 piezômetros com revestimento de PVC de diâmetro de 3,5 cm, com profundidades que variam de 10 a 31 metros e seção filtrante com 2 metros de comprimento posicionada na sua porção final (Figura 1).

Para medição da variação do nível d'água foi utilizado um medidor elétrico da Sauber Systems com medições semanais nos piezômetros durante o início de agosto de 2016 até final de julho de 2019.

Um dos métodos mais amplamente utilizados para o cálculo da recarga baseado em informações da zona saturada é o que utiliza a observação da variação do nível d'água através de piezômetros em aquíferos livres, conhecido como método VNA (Saghravani et al. 2015). Consiste em uma análise pontual da recarga do aquífero observado pelo aumento acentuado do nível d'água em resposta a um determinado evento chuvoso (Wu et al. 2019).

O método VNA, historicamente, foi inicialmente aplicado na década de 1920 e desde então tem sido aplicado em diversos estudos (Healy 2010). Consiste em utilizar a variação do nível d'água em poços de observação (piezômetros), considerando que a sua variação ascendente se deve à infiltração de parcela da água da precipitação que alcançou a zona saturada. A equação para obter a recarga é apresentada a seguir:

$$R = S_y \times dh/dt \rightarrow S_y \times \Delta h/\Delta t \quad (2)$$

Onde  $R$  representa a recarga em mm pelo tempo,  $S_y$  é o coeficiente de armazenamento do aquífero e  $\Delta h/\Delta t$  a variação do nível d'água pelo tempo. Existem duas variantes para o método VNA. Uma considera a correção da recessão não realizada, uma vez que os processos de recessão (evaporação e descarga do aquífero) tendem a continuar durante a subida do nível freático. Dessa forma, o  $\Delta ht$  calculado corresponde à diferença entre o valor mais alto e o valor mais baixo da curva de recessão antecedente extrapolada no momento do pico (método de extrapolação), o que fornece a recarga total. Quando  $\Delta he$  é a diferença entre dois pontos extremos no tempo, o método VNA fornece a recarga efetiva (não há extrapolação) (Figura 2) (Healy & Cook 2002). O estudo aqui proposto utilizará o conceito de recarga total para o SAB localmente.

O método se aplica necessariamente a aquíferos livres em que o nível d'água não seja muito profundo e a resposta a recarga seja representada por rápidas subidas do nível d'água (Scanlon, Healy & Cook 2002), dessa forma, aquíferos com alta condutividade hidráulica e alto coeficiente de armazenamento tendem a apresentar resultados insatisfatórios. Além disso, o método avalia pontualmente a recarga que pode ser bastante variável devido à geologia, declividade, vegetação e outros fatores (Healy 2010).

A principal fonte de incertezas do método está relacionada à determinação do coeficiente de armazenamento que será utilizado (Healy & Cook 2002). Estudos desenvolvidos no SAB em toda sua extensão territorial indicam valores que variam de 0,05 a 0,15 para o coeficiente de armazenamento (Serviço Geológico do Brasil 2012b). Entretanto, este intervalo pode ser melhor definido utilizando-se a recarga potencial calculada pelo método BHC.

Considerando-se que a recarga potencial é a recarga máxima possível, o coeficiente de armazenamento ( $S_y$ ) será definido de modo que o produto da multiplicação dele pela variação do nível d'água no piezômetro ( $\Delta ht$ ) não seja superior a recarga potencial, definindo-se, assim, o valor máximo aceitável de coeficiente de armazenamento para o SAB localmente.

### 3.3 Método por Sensoriamento Remoto - GRACE

Os satélites que compõem o GRACE da NASA foram lançados em março de 2002 e tiveram como objetivo inicial fornecer mensalmente medidas do campo gravitacional da Terra (Rodell & Famiglietti 2001). Entretanto, observou-se que as variações do campo gravitacional do planeta poderiam ser utilizadas para inferir mudanças do Armazenamento de Água na Superfície Terrestre (*Terrestrial Water Storage - TWS*) composta pela soma da umidade do solo, água subterrânea, águas superficiais, neve e gelo, interceptação do dossel e umidade da biomassa (Li et al. 2019). As variáveis armazenamento de água subterrânea (*Groundwater Storage - GWS*) e umidade do solo (*soil moisture - SM*) são as mais representativas do componente TWS, sendo água superficial, neve e água na vegetação geralmente poucos significativas (Rodell & Famiglietti 2001).

De modo geral, os estudos para avaliação da variabilidade de armazenamento das águas subterrâneas se restringem à escala global e regional (Strassberg et al. 2007; Huang et al. 2015), sendo ainda incipientes os estudos em áreas de pequena extensão. Isto se deve à baixa resolução espacial do pixel dos produtos do GRACE, de aproximadamente 200.000 km<sup>2</sup> do TWS (Huang et al. 2015).

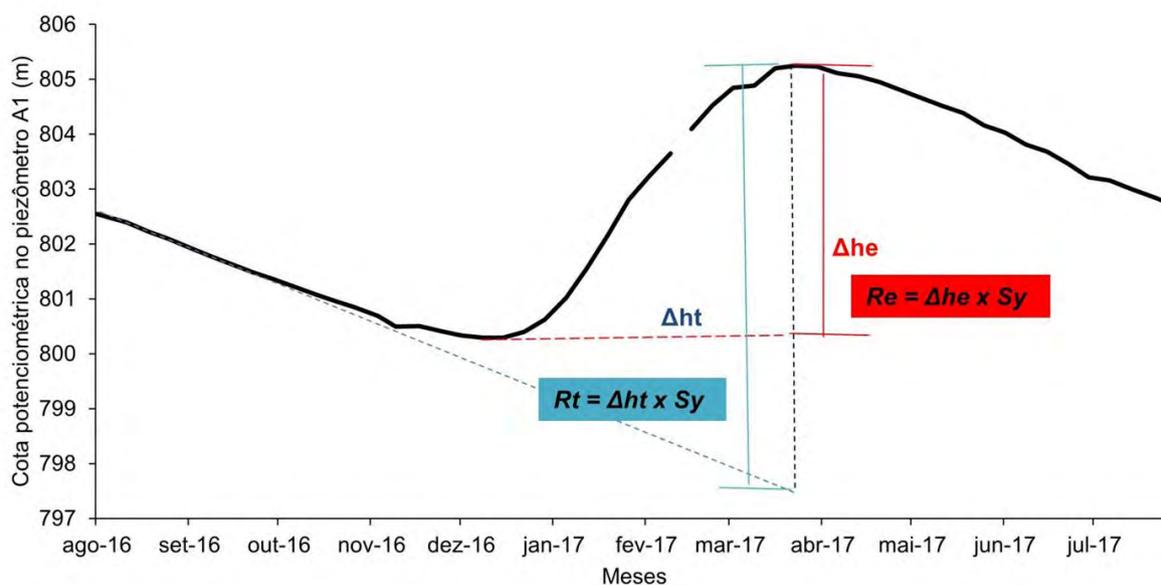


Figura 2 Variação do nível d'água no piezômetro A1 para o Período 1 considerando as duas variantes do método VNA.

Para determinação da recarga das águas subterrâneas usando dados do GRACE, alguns estudos desenvolvidos nos últimos anos calcularam o GWS através da subtração do parâmetro SM, obtida pelo sistema *Global Land Data Assimilation System* (GLDAS), do TWS fornecido pelo GRACE (Henry et al. 2011; Wu et al. 2019).

O GLDAS é um sistema que integra dados observacionais de satélite e de campo e é dotado de um poderoso software (*Land Information System - LIS*) de modelagem hidrológica que visa produzir dados, tais como: umidade do solo, temperatura, evapotranspiração e escoamento superficial. Atualmente o GLDAS opera com 4 modelos de superfície do terreno: *Noah*, *Catchment* (CLSM), o *Community Land Model* (CLM), e o *Variable Infiltration Capacity* (VIC) (Rui & Beaudoin 2020)

Para análise da recarga das águas subterrâneas na área de estudo através do GRACE, foram obtidos os dados da variável GWS da plataforma Giovanni 4.34 para o período de agosto de 2016 a julho de 2019. Esta variável é calculada pelo sistema GLDAS, usando o modelo *Catchment Land Surface Model L4* (CLSM) com geração de dados diários e resolução espacial de  $0,25^\circ$  (~ 25 km). O modelo CSLM simula a água subterrânea rasa através da variável GWS e ela é gerada através da subtração das variáveis Umidade do Solo, Neve, Interceptação do Dossel e Água Superficial do componente TWS (Rui & Beaudoin 2020).

Parte-se do princípio de que o evento de recarga em uma área disponibiliza água para a umidade do solo e zona saturada, aumentando a massa de água da área, que tende a se acumular com o tempo e pode ser facilmente detectado na forma de mudança de massa através dos sensores do GRACE (Wu et al. 2019).

As variações do componente GWS podem ser relacionadas à recarga da água subterrânea pelo princípio do balanço hídrico, uma vez que a variação gráfica de GWS entre o valor mais baixo (vale) e o subsequente mais alto (pico), ao longo de um intervalo de tempo, representaria a recarga no aquífero (Wu et al. 2019).

O método aqui proposto é análogo ao VNA e foi aplicado inicialmente por Henry et al. (2011) onde foi utilizado o conceito de recarga efetiva com base na variação dos dados de GWS. Posteriormente, o método foi replicado por Wu et al. (2019) utilizando o conceito de recarga total com os dados de GWS. No presente estudo a recarga total anual será calculada para cada período através da subtração do valor mais baixo de GWS do valor mais alto subsequente para o período, levando-se em consideração a correção da recessão não realizada. Embora seja aplicado método análogo ao VNA, não será necessário multiplicar o  $\Delta h_t$  pelo  $S_y$ , como exposto na Equação (2), uma vez que o  $\Delta h_t$  é expresso em mm e representa a espessura de água equivalente da variável GWS (Rodell et al. 2007).

Para comparar os dados do GRACE frente às medições *in situ* do nível d'água nos piezômetros, que estão em escalas diferentes, foi realizada uma análise estatística com a determinação do Fator de Correlação Cruzada (FCC), utilizando-se o software Minitab® 18. Através do correlograma é possível avaliar se há uma correlação positiva ou negativa (de -1 a +1) entre os dados. Este tipo de análise é adequado na correlação de duas séries de dados para verificar o atraso (Lag) das respostas temporais de diferentes fontes de dados (McCuen 2003). Como os dados utilizados nessa correlação apresentam um intervalo de aproximadamente 7 dias, tanto para as medidas de nível d'água quanto de GWS, cada Lag calculado pelo FCC corresponderá a esse intervalo de tempo.

## 4 Resultados

Ao longo dos três anos de monitoramento, a precipitação apresentou valores de 1463 mm (Período 1), 1799 mm (Período 2) e de 1934 mm (Período 3), com período chuvoso concentrado nos 6 meses compreendidos entre outubro e março, quando ocorrem, em média, 87% das chuvas. A evapotranspiração real mensal obtida da estação meteorológica variou de 91 a 172 mm e com base nesses dados foi possível definir os meses em que ocorrem excedente hídrico, definindo assim o período susceptível à recarga do SAB (Figura 3).

O excedente hídrico ocorre nos meses em que a precipitação é superior a evapotranspiração real, no intervalo de outubro a janeiro no Período 1, de novembro a fevereiro no Período 2 e de outubro a dezembro e, excepcionalmente, em março no Período 3 (Figura 3). Dessa forma, tem-se uma recarga potencial de 638, 1007 e 1062 mm para os Períodos 1, 2 e 3, respectivamente.

De modo geral, a profundidade do nível d'água nos piezômetros variou de poucos metros a aproximadamente 18 metros, sendo que os piezômetros com nível d'água mais raso (A4, A5, A9 e A10) encontram-se próximo à drenagem na porção sudeste da área e os que possuem o nível d'água mais profundo (A1 e A8) se situam perto do divisor de águas na porção noroeste da área (Figura 1).

A chegada da água da chuva na zona saturada, consequentemente a recarga, ocorre em tempos distintos na área de estudo. Nos poços em que o nível d'água encontra-se mais próximo à superfície, normalmente a partir do mês de outubro, observa-se o início da subida do nível d'água, enquanto poços com nível d'água mais profundo, essa subida começa a ser observada no mês de dezembro, cerca de dois meses após o início da estação chuvosa (Figura 4).

Para se calcular a recarga das águas subterrâneas pelo método VNA foi necessário definir o valor de coeficiente de armazenamento do SAB para a área, uma vez que estudos desenvolvidos no SAB indicam uma variabilidade

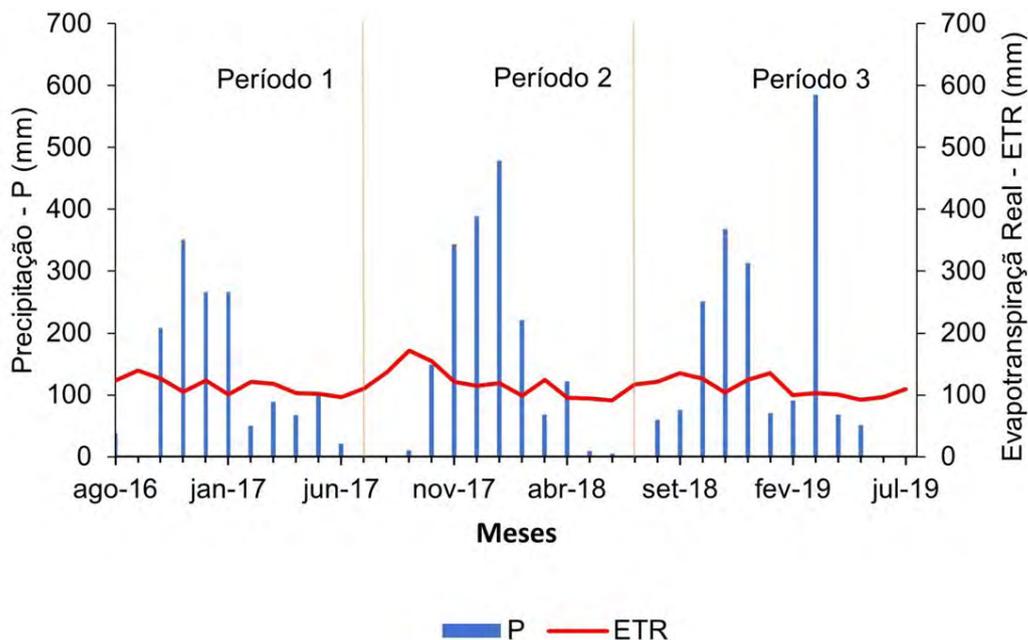


Figura 3 Distribuição de Precipitação (P) e Evapotranspiração Real (ETR) na área de estudo entre os meses de agosto de 2016 e julho de 2019.

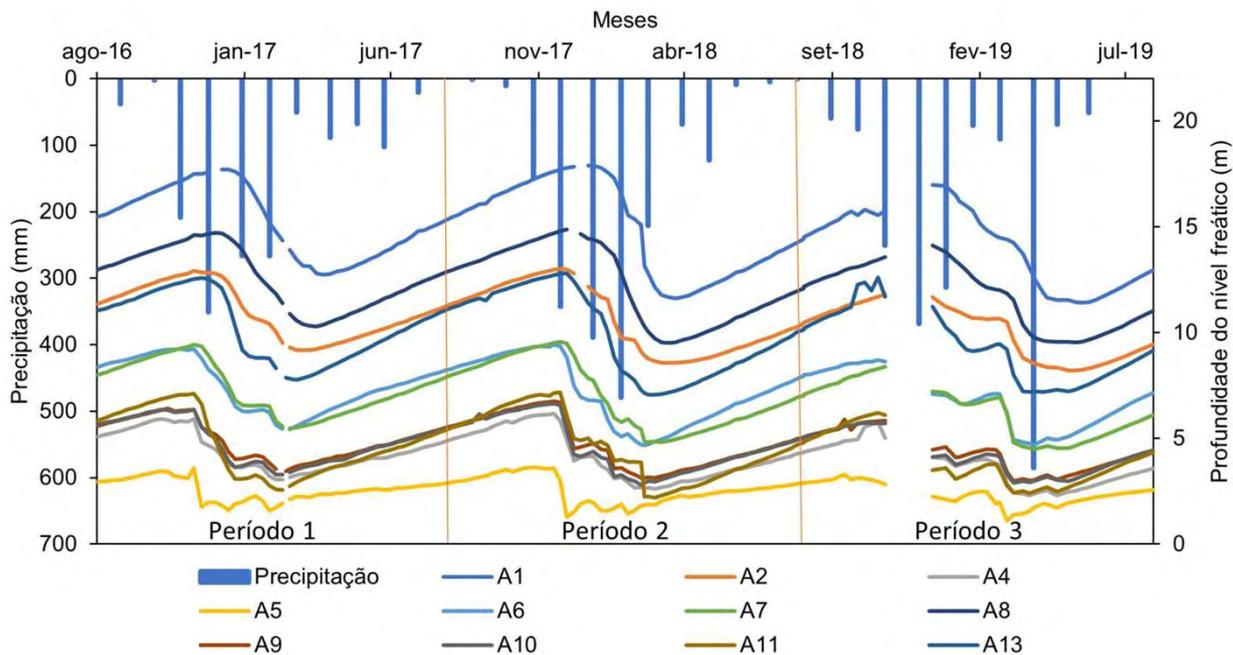


Figura 4 Variação da profundidade do nível freático nos piezômetros para o período de agosto de 2016 a julho de 2019.

de 0,05 a 0,15 (Serviço Geológico do Brasil 2012b). De modo a diminuir essa faixa de valores a ser adotada, foram utilizados os valores de recarga potencial dos 3 períodos, associando com a variação do nível d'água nos 11 piezômetros. Considerando que a recarga calculada em cada

piezômetro corresponde ao produto da variação do nível d'água pelo coeficiente de armazenamento (Equação 2), a recarga potencial balizará a recarga máxima calculada que cada piezômetro pode ter, indicando o maior valor possível de coeficiente de armazenamento, dentro da faixa aceitável

para o SAB (0,05 a 0,15). Para o período 1, frente à variação de nível d'água ( $\Delta h$ ) dos piezômetros, o maior valor de coeficiente de armazenamento determinado para o aquífero de modo que não ultrapassasse a recarga potencial de 638 mm foi de 0,09 no piezômetro A1. Para os períodos 2 e 3, com recarga potencial de 1007 e 1062 mm, o coeficiente de armazenamento máximo possível, frente a variação do nível d'água em cada piezômetro, foi de 0,12 e 0,11, respectivamente, ou seja, valores superiores ao obtido para o período 1 e que caso adotados seriam incompatíveis frente à recarga potencial calculada.

Dessa forma, mediante a definição do intervalo de valores de coeficiente de armazenamento ( $S_y$ ) aceitável para o SAB localmente (0,05 a 0,09), foi calculada a recarga pelo método VNA para os outros piezômetros. Dessa forma, aplicando-se a Equação (2), tem-se que para um  $S_y$  de 0,05 a recarga média anual foi de 267, 313 e 325 mm para os Períodos 1, 2 e 3, respectivamente, com uma média por período de 302 mm. Enquanto, ao considerar um valor máximo de  $S_y$  de 0,09, a recarga média anual foi de 479, 559 e 584 mm para os Períodos 1, 2 e 3, respectivamente, com uma média por período de 541 mm (Figura 5).

Aplicando-se o método desenvolvido por Wu et al. (2019), que consiste em uma variação do método VNA, utilizando-se a variação da componente GWS obtida pelo GRACE, os dados indicam que o período de recarga é de outubro a março, podendo ter variações, e as recargas chegam a 500 mm para o Período 1 e 2 e 550 mm para

o Período 3, gerando uma média por período de 517 mm (Figura 6).

Constata-se que os dados do GRACE e a profundidade do nível d'água dos piezômetros apresentaram boa correlação na indicação do início e término da recarga das águas subterrâneas. Entretanto, observa-se que essa informação só tem correspondência nos piezômetros que apresentam nível d'água em uma determinada faixa de profundidade. Correlogramas e gráficos dos dados do GWS do GRACE com as profundidades do nível d'água para os piezômetros A11 e A1, com nível d'água raso e outro profundo, respectivamente, foram utilizados para avaliar esta correlação (Figura 7).

Para o piezômetro A11, observa-se que o início e término da recarga nos dados GWS do GRACE são coincidentes (Figura 7B), essa relação fica bem evidenciada na análise da correlação cruzada através do correlograma (Figura 7A) que apresenta um LAG igual a zero, ou seja, não há defasagem temporal e um FCC de  $-0,66$ . As figuras 7C e 7D mostram um atraso de aproximadamente 35 dias ( $LAG = 5$ ) para o piezômetro A1, que possui o nível de água subterrânea mais profundo de todos, mesmo assim apresenta um FCC de  $-0,6$ . Ou seja, os dados GWS do GRACE têm melhor correspondência nos piezômetros com profundidade de nível d'água de, aproximadamente, 4 a 9 metros, exatamente os piezômetros A6, A9 e A11 que possuem LAG igual a zero.

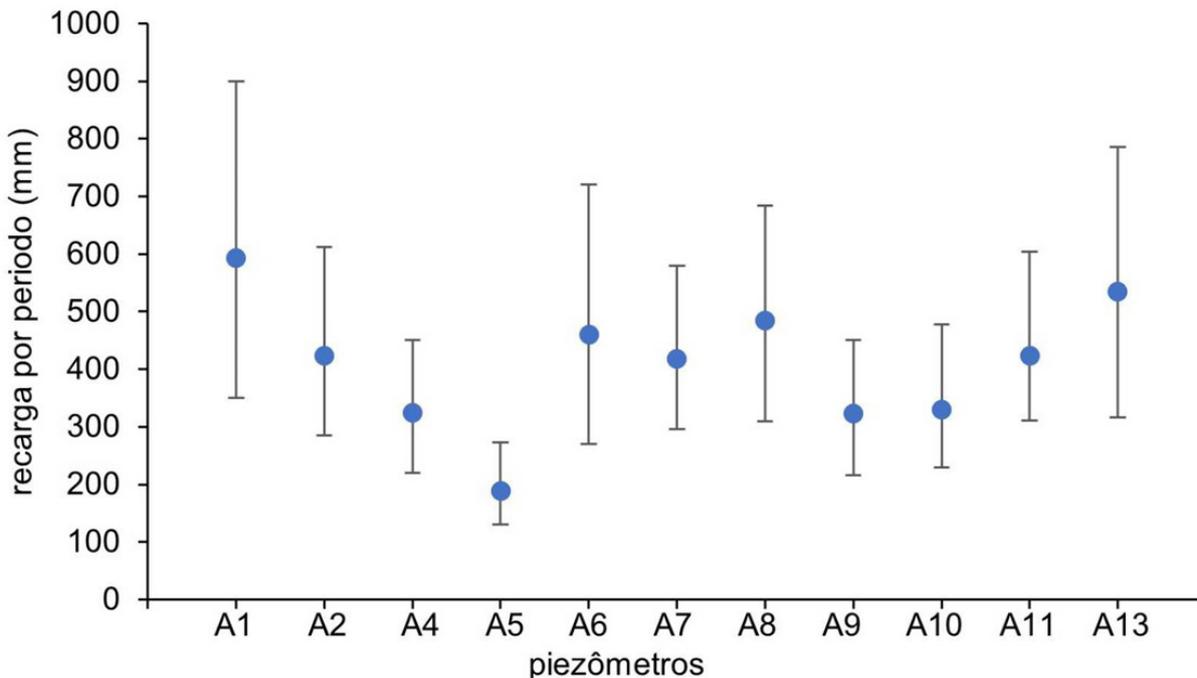
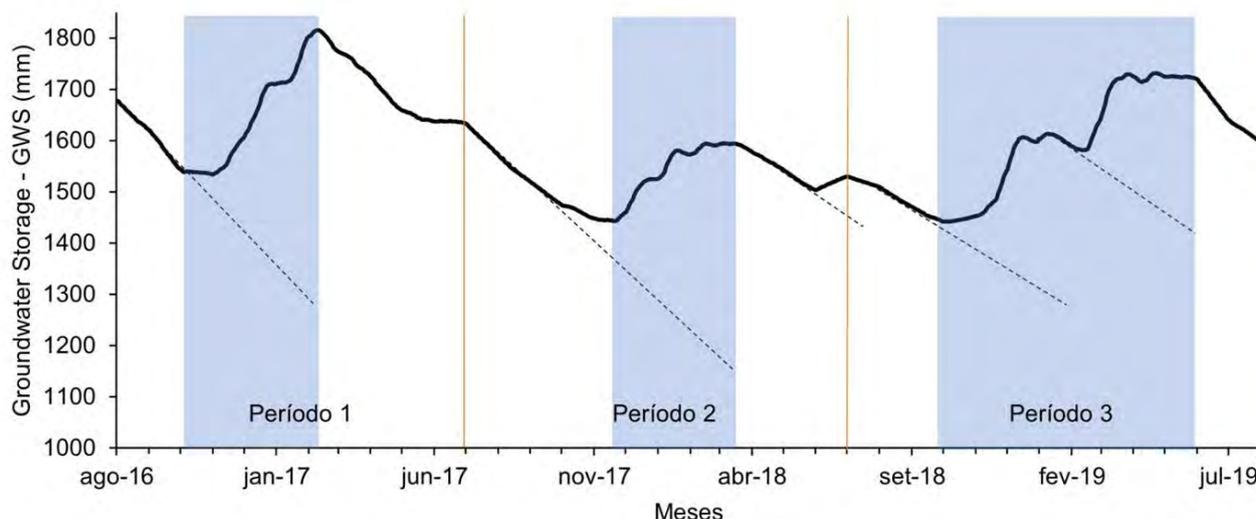
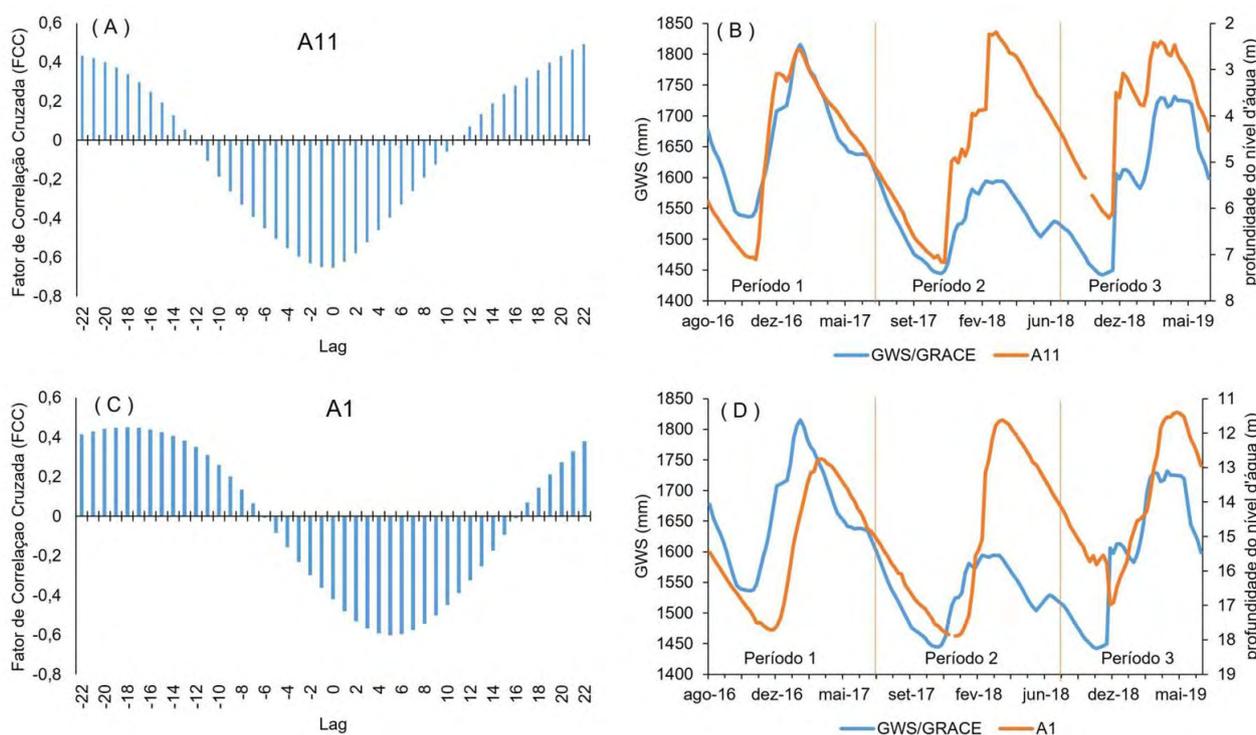


Figura 5 Média e variação da recarga em cada piezômetro no período de estudo para o intervalo de coeficiente de armazenamento definido (0,05 a 0,09).



**Figura 6** Variação do GWS do GRACE-GLDAS com identificação do período em que se concentra a recarga no SAB (retângulo azul) na área de estudo.

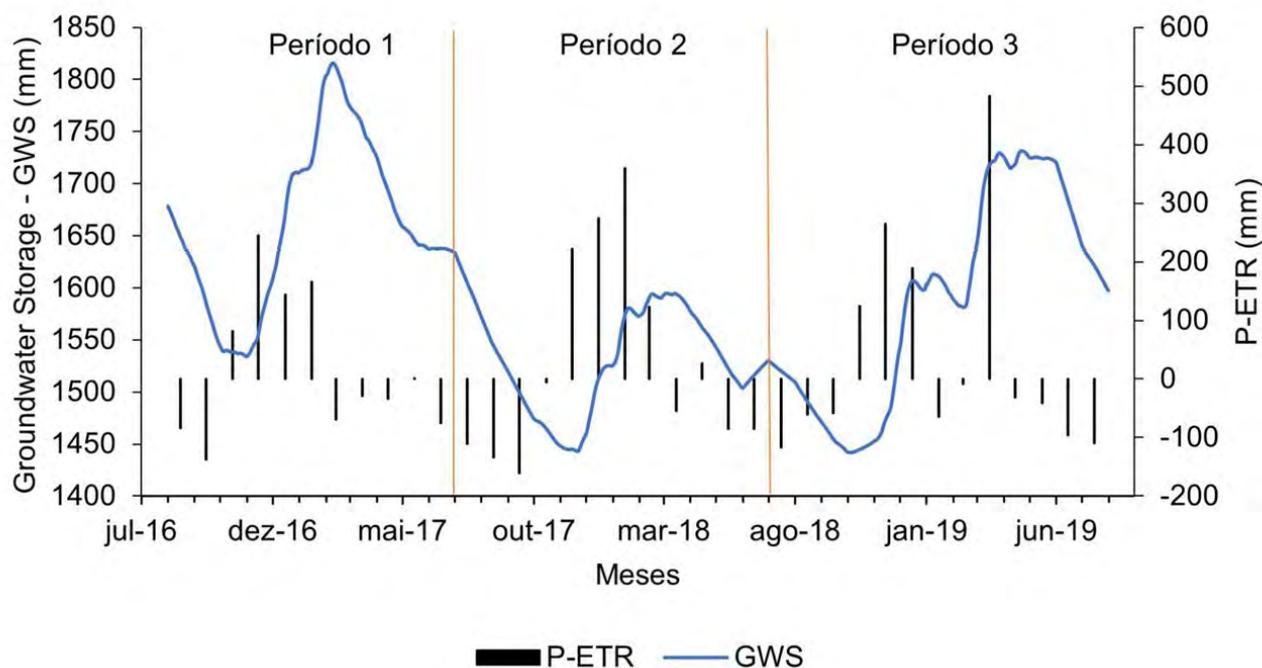


**Figura 7** Correlograma e gráfico da profundidade do nível d'água nos piezômetros A1 e A11 com os dados GWS do GRACE.

A variação do GWS quando comparada com a variação da profundidade nos 11 piezômetros apresentou uma significativa correlação cruzada, média de -0,63, para uma variação de FCC de -0,59 a -0,66.

Com base nos dados meteorológicos obtidos na estação local, foi possível identificar os meses ao longo dos três anos de estudo em que houve excedente e déficit

hídrico. Ao correlacioná-los com os dados das variações do GWS, é possível observar que os períodos em que há aumento do volume de água subterrânea armazenada, representada pela variável GWS, é exatamente o período em que há excedente hídrico e, conseqüentemente, a recarga. Da mesma forma, quando há diminuição dos valores de GWS ocorre um período de déficit hídrico (Figura 8).



**Figura 8** Correlação dos períodos de excedente e déficit hídrico (P – ETR) com os dados GWS do GRACE (P = Precipitação e ETR = Evapotranspiração Real).

## 5 Discussão

A recarga potencial calculada foi uma importante ferramenta na definição do maior valor compatível do coeficiente de armazenamento no SAB para aplicação do método VNA. Dessa forma, o valor médio da recarga anual na área de estudo, para esse método, foi de 302 mm, para um coeficiente de armazenamento de 0,05, podendo chegar a 541 mm quando considerado o coeficiente de armazenamento de 0,09. Para o cálculo da recarga utilizando os dados GWS do GRACE, a recarga média anual foi de 517 mm, valor relativamente próximo ao limite superior do valor obtido pelo método VNA. A aplicação do método adotado por Wu et al. (2019) para o cálculo da recarga total, através de dados GWS do GRACE, se mostrou bastante eficiente para o SAB localmente.

Os valores de recarga total média anual para o SAB, obtidos com as metodologias aplicadas, levam a considerar um valor de coeficiente de armazenamento próximo ao limite superior da faixa adotada (0,05 a 0,09), valor bem abaixo do máximo encontrado em outros estudos no SAB (0,15). Tal fato pode estar relacionado à característica geológica da Formação Uberaba, que apresenta ocorrência restrita a cidade homônima, e tem como característica uma cimentação carbonática intensa que influi em sua porosidade e, consequentemente, em sua capacidade de armazenamento (Serviço Geológico do Brasil 2012b).

Em estudos desenvolvidos no SAB no município de Araguari, no Triângulo Mineiro, foram encontrados valores de recarga anual que variam de 243 a 807 mm, e que correspondem a taxas de infiltração da chuva de 23 a 51% (Bertol 2007). As taxas de recarga aqui calculadas estão dentro da faixa dos valores supracitados e, comparando com as taxas de infiltração da chuva em estudos na região de Araguari (MG), os valores obtidos variam de 17 a 31%.

O cálculo da recarga durante os três anos de estudo indicou valores crescentes em todos os métodos utilizados, isto pode ser explicado pelo aumento da precipitação entre agosto de 2016 a julho de 2019. Além disso, fica também evidente a oscilação positiva das cotas potenciométricas do aquífero nos piezômetros monitorados, o que implica em um maior volume da reserva renovável para o SAB localmente. A recarga se deu de forma heterogênea na área, onde a área com nível freático mais profundo tende a apresentar recargas mais elevadas do que as áreas com nível freático mais raso. O período de recarga, de modo geral, ocorre de outubro a março, podendo variar anualmente.

Os dados GWS fornecidos pelo GRACE apresentaram boa correspondência com os dados de campo de variação de nível d'água nos 11 piezômetros instalados na microbacia. O valor médio de FCC de -0,63 é bastante significativo e a profundidade de nível d'água entre 4 e 9 metros foi a que apresentou melhor correlação temporal (LAG igual a zero) nos piezômetros A6, A9 e A11. Além disso, a sobreposição gráfica da variação do GWS com

os valores de P - ETR indicou a estreita relação entre a ocorrência do período de excedente hídrico com o aumento dos valores de GWS, e do período de déficit hídrico com a redução dos valores de GWS.

## 6 Conclusões

Estudos para determinação das características hidrogeológicas do SAB no Triângulo Mineiro ainda são bastante escassos e a falta de dados primários compromete o avanço do conhecimento hidrogeológico da região. A utilização de dados de sensoriamento remoto dos satélites do GRACE apresentou-se bastante promissor para avaliação dos recursos hídricos subterrâneos mesmo em escala de detalhe.

Os resultados trazem perspectivas positivas para aplicação do GRACE em outras bacias em escalas diferenciadas com uma significativa correlação entre os dados do GRACE e a variação do nível freático nos piezômetros monitorados, além da indicação do aumento dos valores de GWS exatamente no período quando ocorre o excedente hídrico, o que reforça essa premissa.

A utilização da variável GWS, calculada pelo modelo CSLM recentemente desenvolvida para o GRACE, se mostrou bastante eficiente para determinação da taxa de recarga na área de estudo. A utilização do método aplicado por Wu et al. (2019), uma variação do método VNA, também se mostrou aplicável para escalas menores. Entretanto, é necessário replicar essa metodologia em outras áreas para validar sua aplicabilidade.

## 7 Agradecimentos

Os autores agradecem ao Núcleo Interinstitucional de Estudos Ambientais (NIEA) da Coordenadoria Regional das Promotorias de Justiça do Meio Ambiente das Bacias dos Rios Paranaíba e Baixo Rio Grande do Ministério Público do Estado de Minas Gerais pela liberação de recursos para aquisição de equipamentos que resultaram no desenvolvimento deste trabalho. À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela bolsa de doutorado concedida ao autor principal, ao editor associado Prof. Dr. Gerson Cardoso da Silva Júnior e ao revisor da revista que contribuíram para o aperfeiçoamento deste artigo.

## 8 Referências

Abbott, B.W.; Bishop, K.; Zarnetske, J.P.; Minaudo, C.; Chapin, F.S.; Krause, S.; Hannah, D.M.; Conner, L.; Ellison, D.; Godsey, S.E.; Plont, S.; Marçais, J.; Kolbe, T.; Huebner, A.; Frei, R.J.; Hampton, T.; Gu, S.; Buhman, M.; Sara Sayedi, S.; Ursache, O.; Chapin, M.; Henderson, K.D. & Pinay, G. 2019, 'Human Domination of the Global Water Cycle Absent from Depictions and Perceptions', *Nature Geoscience*, vol.

- 12, no. 7, pp. 533–40. <https://doi-org.ez33.periodicos.capes.gov.br/10.1038/s41561-019-0374-y>
- Batezelli, A.; Saad, A.R.; Fulfaro, V.J.; Corsi, A.C.; Landim, P.M.B. & Perinoto, J.A.D.J. 2005, 'Análise de Bacia Aplicada às Unidades Mesozoicas do Triângulo Mineiro (Sudeste do Brasil): Uma Estratégia na Prospecção de Recursos Hídricos Subterrâneos', *Águas Subterrâneas*, vol. 19, no. 1, pp. 61-73. <https://doi.org/10.14295/ras.v19i1.1352>
- Bertol, G.A. 2007, 'Avaliação da Recarga Anual no Aquífero Bauru no Município de Araguari, Minas Gerais', Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais.
- Bertol, G.A.; Camargos, C.C.; Velásquez, L.N.M.; Branco, O.E.A. & Cota, S.D.S. 2006, 'Aplicação do Método do Cálculo do Balanço Hídrico na Avaliação da Recarga no Aquífero Bauru em Araguari – MG', *XIV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas*, Curitiba.
- Cândido, H.G.; Galbiatti, J.A.; Pissarra, T.C.T. & Martins Filho, M.V. 2010, 'Degradação Ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Uberaba: Uma Abordagem Metodológica', *Engenharia Agrícola*, vol. 30, no. 1, pp. 179–192. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162010000100019>
- De Vries, J.J. & Simmers, I. 2002, 'Groundwater Recharge: An Overview of Process and Challenges' *Hydrogeology Journal*, vol. 10, pp. 5–17. <https://doi-org.ez33.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s10040-001-0171-7>
- Delin, G.N. & Risser, D.W. 2007, *Ground-Water Recharge in Humid Areas of the United States - A Summary of Ground-Water Resources Program Studies, 2003-06*, Groundwater Resources Program, USGS.
- Fiumari, S.L. 2004, 'Caracterização do Sistema Hidrogeológico Bauru no Município de Araguari – MG', Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais.
- Healy, R.W. 2010, *Estimating Groundwater Recharge*, Cambridge University Press, New York.
- Healy, R.W. & Cook, P.G. 2002, 'Using Groundwater Levels to Estimate Recharge', *Hydrogeology Journal*, vol. 10, pp. 91–109. <https://doi-org.ez33.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s10040-001-0178-0>
- Henry, C.M.; Allen, D.M. & Huang, J. 2011, 'Groundwater Storage Variability and Annual Recharge Using Well-hydrograph and GRACE Satellite Data', *Hydrogeology Journal*, vol. 19, pp. 741–55. <https://doi-org.ez33.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s10040-011-0724-3>
- Huang, Z.; PAN, Y.; Gong, H.; Yeh, P.J.F.; Li, X.; Zhou, D. & Zhao, W. 2015, 'Subregional-scale Groundwater Depletion Detected by GRACE for Both Shallow and Deep Aquifers in North China Plain', *Geophysical Research Letters*, vol. 42, no. 6, pp. 1791–99. <https://doi-org.ez33.periodicos.capes.gov.br/10.1002/2014GL062498>
- Islam, S.; Singh, R.K. & Khan, R.A. 2015, 'Methods of Estimating Groundwater Recharge', *International Journal of Engineering Associates*, vol. 5, no. 2, pp. 6-9.
- Li, B.; Rodell, M.; Kumar, S.; Beaudoin, H.K.; Geritana, A.; Zaitchik, B.F.; De Gonçalves, L.G.; Cossetin, C.; Bhanja, S.; Mukherjee, A.; Tian, S.; Tangdamrongsub, N.; Long, D.; Nanteza, J.; Lee, J.; Policelli, F.; Goni, I.B.; Daira, D.; Bila, M.; De Lannoy, G.; Mocko, D.; Steele-Dunne, S.C.; Save, H. & Bettadpur, S. 2019, 'Global GRACE Data

- Assimilation for Groundwater and Drought Monitoring: Advances and Challenges, *Water Resources Research*, vol. 55, no. 9, pp. 7564–86. <https://doi-org.ez33.periodicos.capes.gov.br/10.1029/2018WR024618>
- Martins, M. S. M. 2020, 'Índice de Vulnerabilidade Natural para Conservação da Área de Proteção Ambiental do Rio Uberaba – MG', Tese de Doutorado, Universidade Estadual Paulista Campus Jaboticabal.
- Mccuen, R. H. 2003, *Modeling Hydrologic Change: Statistical Methods*, Lewis Publishers, Florida.
- Missteat, B.D.R.; Brown, L. & Johnston, P.M. 2009, 'Estimation of Groundwater Recharge in a Major Sand and Gravel Aquifer in Ireland Using Multiple Approaches', *Hydrogeology Journal*, vol. 17, pp. 693–706. <https://doi-org.ez33.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s10040-008-0376-0>
- Novais, G.T.; Brito, J.L.S. & Sanches, F.O. 2018, 'Unidade Climáticas do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba', *Revista Brasileira de Climatologia*, vol. 23, pp. 223–43.
- Oliveira, L.A. & Campos, J.E.G. 2004, 'Parâmetros Hidrogeológicos do Sistema Aquífero Bauru Na Região De Araguari/Mg: Fundamentos para a Gestão do Sistema de Abastecimento de Água', *Revista Brasileira de Geociências*, vol. 34, no. 2, pp. 213–18.
- Rocha, G. 2005, 'Mapa de Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo', Escala 1:1.000.000. Nota Explicativa. DAEE, IG, IPT, CPRM. São Paulo.
- Rodell, M.; Chen, J.; Kato, H.; Famiglietti, J.S.; Nigro, J.; Wilson, C.R. 2007, 'Estimating Groundwater Storage Changes in the Mississippi River Basin', *Hydrogeology Journal*, vol. 15, pp. 159–66. <https://doi-org.ez33.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s10040-006-0103-7>
- Rodell, M. & Famiglietti, J.S. 2001, 'An Analysis of Terrestrial Water Storage Variations in Illinois with Implications for the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE)', *Water Resources Research*, vol. 37, no. 5, pp. 1327–39. <https://doi-org.ez33.periodicos.capes.gov.br/10.1029/2000WR900306>
- Rui, H.L. & Beaudoin, H. 2020, *README Document for NASA GLDAS Version 2 Data Products*, NASA - Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC).
- Saghravani, S.R.; Yusoff, I.; Tahir, W.Z.W.M. & Othman, Z. 2015, 'Comparison of Water Table Fluctuation and Chloride Mass Balance Methods for Recharge Estimation in a Tropical Rainforest Climate: A Case Study from Kelantan River Catchment, Malaysia', *Environmental Earth Sciences*, vol. 73, pp. 4419–28. <https://doi/10.1007/s12665-014-3727-2>
- Scanlon, B.R.; Healy, R.W. & Cook, P.G. 2002, 'Choosing Appropriate Techniques for Quantifying Groundwater Recharge', *Hydrogeology Journal*, vol. 10, pp.18–39. <https://doi-org.ez33.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s10040-001-0176-2>
- Serviço Geológico do Brasil 2012a, *Relatório Diagnóstico Sistema Aquífero Bauru - Caiuá no Estado de Minas Gerais. Levantamento de Recursos Hídricos Subterrâneos*, Projeto Rede Integrada de Monitoramento de Águas Subterrâneas, vol. 13.
- Serviço Geológico do Brasil 2012b, *Relatório Diagnóstico Sistema Aquífero Bauru-Caiuá nos Estados de São Paulo, Mato Grosso do Sul e Paraná. Levantamento de Recursos Hídricos Subterrâneos*, Projeto Rede Integrada de Monitoramento de Águas Subterrâneas, vol. 14.
- Silva, I.C.O. & Campos, J.C.V. 2018, 'Potencial Hidrogeológico da Cidade de Uberaba – MG', *XX Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas*, Campinas.
- Strassberg, G.; Scanlon, B.R. & Rodell, M. 2007, 'Comparison of Seasonal Terrestrial Water Storage Variations from GRACE with Groundwater-Level Measurements from the High Plains Aquifer (USA)', *Geophysical Research Letters*, vol. 34, no. L14402, pp. 1–5. <https://doi-org.ez33.periodicos.capes.gov.br/10.1029/2007GL030139>
- Torres, J.L.R. & Fabian, A.J. 2006, 'Levantamento Topográfico e Caracterização da Paisagem para Planejamento Conservacionista numa Microbacia Hidrográfica de Uberaba', *Caminhos de Geografia*, vol. 6, no. 19, pp. 150–9. <https://doi.org/10.13140/2.1.4795.0408>
- Tucci, C.E.M. 2004, *Hidrologia: Ciência e Aplicação*. 3ª ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS: ABRH, 943p.
- United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization 2019, *The United Nations World Water Development Report 2019: Leaving No One Behind*, UNESCO Digital Library, Paris.
- Velásquez, L.N.M.; Branco, O.E.A.; Carvalho Filho, C.A.; Minardi, P.S.P.; Cota, S.D.S.; Bomtempo, V.L.; Camargos, C.C.; Rodrigues, P.C.H. & Fiumari, S.L. 2008, 'Caracterização Hidrogeológica dos Aquíferos Bauru e Serra Geral e Avaliação das Reservas do Aquífero Bauru no Município de Araguari , Minas Gerais', *XV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas*, Natal, 2008, p. 20.
- Wu, Q.; Si, B.; He, H. & Wu, P. 2019, 'Determining Regional-Scale Groundwater Recharge with GRACE and GLDAS', *Remote Sensing*, vol. 11, no. 2, p. 154. <https://doi.org/10.3390/rs11020154>

Recebido em: 30/12/2020

Aprovado em: 16/03/2021

**Como citar:**

Campos, J.C.V., Gastmans, D., Santarosa, L.V., Lopes, I.O., Alves, M.C.P., Martins, L.F. & Fabian, A.J. 2021, 'Estimativas da Recarga do Sistema Aquífero Bauru em uma Microbacia no Entorno da Cidade de Uberaba – MG', *Anuário do Instituto de Geociências*, vol. 44: 40585. [https://doi.org/10.11137/1982-3908\\_2021\\_44\\_40585](https://doi.org/10.11137/1982-3908_2021_44_40585)