

Mapeamento da recarga de águas subterrâneas no Sistema Aquífero Bauru (SAB) em área de proteção ambiental durante o ano hidrológico 2014/15

Vitor Fidelis Monteiro Gonçalves¹; Lucas Vituri Santarosa¹; Rodrigo Lilla Manzione²

Resumo: Com a iminência de uma crise hídrica, as águas subterrâneas ganharam destaque, fomentando os estudos capazes de dimensionar os limites de exploração dos recursos hídricos subterrâneos. A recarga de águas subterrâneas é um dos principais fatores para o ciclo hidrológico, e é uma medida importante para moderar a exploração de volumes estratégicos sem comprometer funções naturais dependentes do aquífero. Foram calculados os valores de recarga em 21 poços de monitoramento dispostos em duas bacia nos domínios da Estação Ecológica de Santa Barbara (EEcSB), município de Águas de Santa Bárbara/SP. O método utilizado para determinar a recarga pontual por poço foi o método da Variação da Superfície livre (WTF). Os resultados mostram o valor médio da recarga e seu comportamento espacial em relação das feições do relevo naturais e antrópicas. Com esse conhecimento da dinâmica da oscilação do nível freático é possível reunir dados capazes de auxiliar o planejamento do uso da água subterrânea e garantir manejo sustentável do Sistema Aquífero Bauru (SAB).

Abstract: With the imminence of water crisis, groundwater have been highlighted, fomenting the studies able to size the exploration limits of groundwater. The groundwater recharge is one of the main factors for hydrological cycle and it is an important action to moderate the strategic volumes exploration without compromising natural functions, which depends on the aquifer. It were calculated the recharge values from 21 monitoring wells in two watersheds in the domain of Santa Barbara ecological station (EEcSB), Águas de Santa Bárbara county. The method used to determine the specific recharge in each well was the water table fluctuation method (WTF). The results show the average recharge value and its spatial behavior related to natural and anthropic landscape features. With this knowledge of water table oscillation dynamics it is

¹ Aluno regular do curso de mestrado em Agronomia (Irrigação e Drenagem), UNESP – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus de Botucatu.

² Professor Assistente Doutor, UNESP – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus de Ourinhos

possible to gather data able to help the planning of groundwater use and assure sustainable management Bauru Aquifer system (SAB).

Palavras-chave: WTF, recarga de aquífero

INTRODUÇÃO

Com a crise hídrica no estado de São Paulo, no biênio 2014/2015, as águas subterrâneas ganharam destaque na agenda dos pesquisadores, autoridades e sociedade civil, em geral. Diante desta realidade a compreensão das dinâmicas dos recursos hídricos subterrâneos tornou-se fundamental para realização de uma gestão eficiente. Entender o comportamento dos padrões sazonais e mensurar os volumes disponíveis para exploração é fundamental para não colocar em risco a capacidade estratégica e as muitas funções ambientais que dependem dos volumes de água subterrânea. A recarga de águas subterrâneas é um dos principais fatores para o ciclo hidrológico, e em muitos estudos de modelagem, é comum associar a recarga à uma fração da chuva. Em estudo relacionado às águas superficiais, a recarga pode ser considerada como um dado residual (BAKKER et al., 2013).

Os métodos para a estimativa da recarga de águas subterrâneas pode ser dividido em três tipos, definido a partir de zonas: saturada, não saturada, e de água superficial (HEALY, 2010). Além dos métodos baseados em balanço hídrico. Os métodos relacionados a essa zona de água superficial são: balanço hídrico do canal, medidores de *seepage*, modelos de bacia, traçadores isotópicos e escoamento de base. Os métodos classificados como baseados na zona não-saturada são: Lisímetros, Plano de Fluxo Zero (ZFP), Lei de Darcy, Traçadores Históricos e Ambientais, Traçadores aplicados e Modelagem numérica. Os métodos apontados como pertencentes aos baseados na zona saturada são: Variação do nível freático, Lei de Darcy, Traçadores Históricos, Traçadores Ambientais e Modelagem numérica (SCANLON et al.,2002; LUCAS,2012).

Outros estudos buscam entender a recarga de águas subterrâneas e sua dinâmica, através de diversos métodos e técnicas, e em diferentes partes do mundo. Adhikary et al. (2012) em seu trabalho, estimou a recarga a partir da precipitação e da observação dos níveis freáticos em Bangladesh. Hayashi e Farrow (2014) analisaram a resposta da recarga à variabilidade interanual e interdecadal da precipitação em âmbito de bacia hidrográfica no Canadá. Wendland et al. (2015) estudou a contribuição da recarga na área de afloramento do Sistema Aquífero Guarani em uma bacia representativa, utilizou o método da *Variação do Nível Freático* (WTF). Prada et al. (2016) utilizaram isótopos estáveis para caracterizar as fontes de recarga de água subterrâneas na região da Ilha da Madeira, Portugal.

A recarga das águas subterrâneas é uma variável chave para o manejo de aquíferos e é também muito difícil de ser mensurada com acurácia aceitável. Isso ocorre por causa da complexidade do processo de recarga que depende de numerosos fatores atuando em diferentes escalas (HORNERO et al., 2016). Assim, verifica-se a necessidade de organizar os estudos das águas subterrâneas na dimensão espacial. Pois a análise espacial tem como objetivo mensurar propriedades e relações levando em conta a localização espacial de um fenômeno com intuito de entender sua dimensão e as interações no espaço (DRUCK, 2004).

Entender espacialmente o comportamento da recarga do aquíferos para identificar os fatores que influenciam diretamente no seu comportamento é fundamental para realização do planejamento da exploração da água subterrânea. Ao identificar o comportamento regionalizado da recarga dos aquíferos é possível traçar estratégias de exploração compatível com seu comportamento natural, garantindo uma exploração sustentável.

Este trabalho teve como objetivo mapear a recarga calculada a partir do método *da Variação do Nível Freático* (WTF) em área do Sistema Aquífero Bauru (SAB), nos domínios da Estação Ecológica de Santa Barbara (EEcSB), município de Águas de Santa Bárbara/SP. Especificamente, buscou-se verificar o comportamento espacial da recarga para o SAB no ano hidrológico 2014/2015 realizando a predição espacial da estimativa da recarga para compreensão do seu comportamento na área de duas bacias hidrográficas.

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de estudo

A Estação Ecológica de Santa Bárbara (EEcSB) é uma área de 2.712 hectares localizada no município de Águas de Santa Bárbara, região sudoeste do estado de São Paulo (Figura 1). A área está inserida na Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos 17 (UGRHI-17), Médio-Paranapanema. O clima da região é o Cwa (quente e úmido com inverso seco), segundo a classificação Köppen. A vegetação da área consiste em dois biomas: Cerrado e Mata Atlântica (Floresta Estacional Semidecidual), além de reflorestamentos comerciais, como o pinus e o eucalipto (Melo e Durigan, 2011)

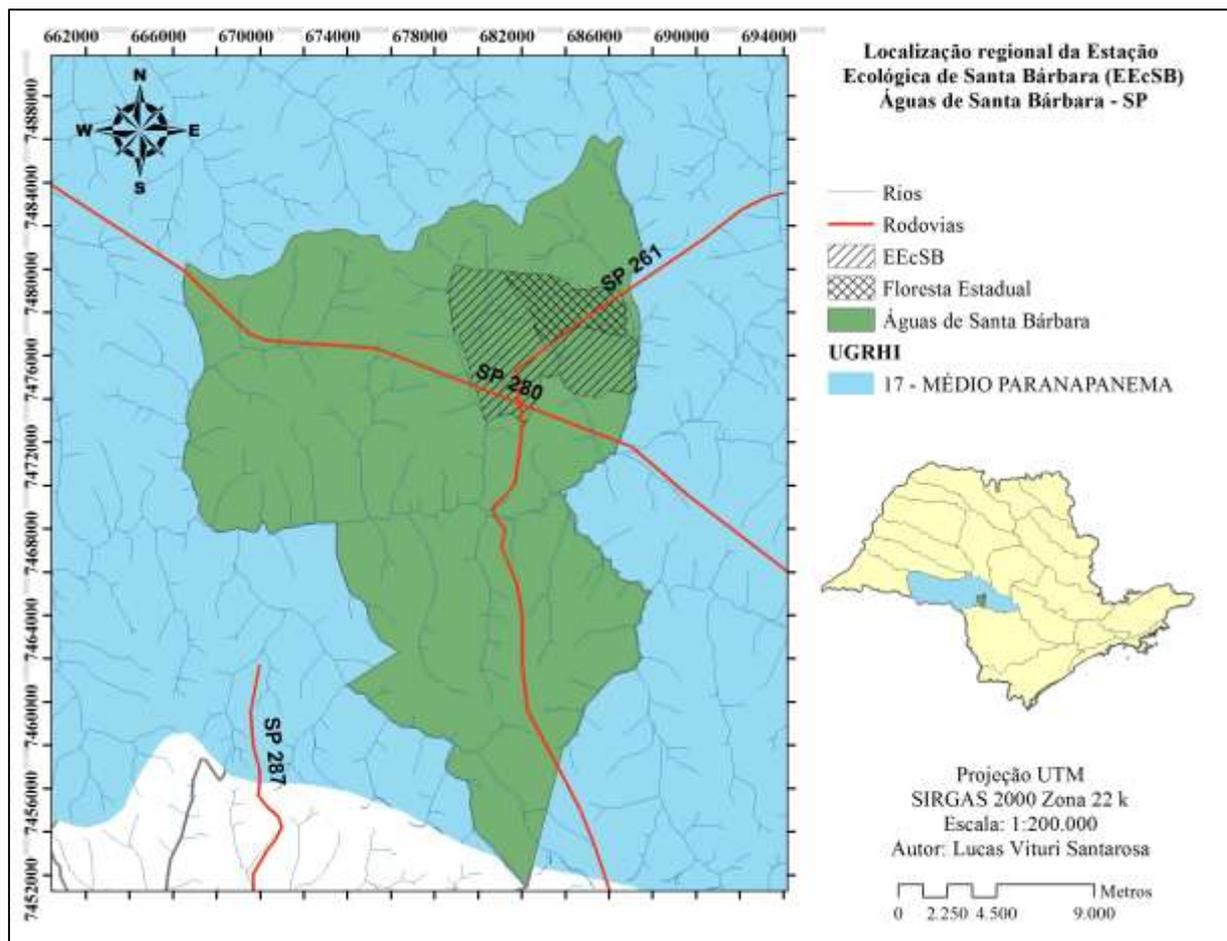


Figura 1: Área de estudo

Foram utilizadas informações coletadas em 21 poços de monitoramento dispostos nas bacias do Ribeirão Guarantã e Santana (Figura 2), para calcular a recarga foram utilizadas medições de setembro de 2014 até agosto 2015, caracterizando um ano hidrológico.

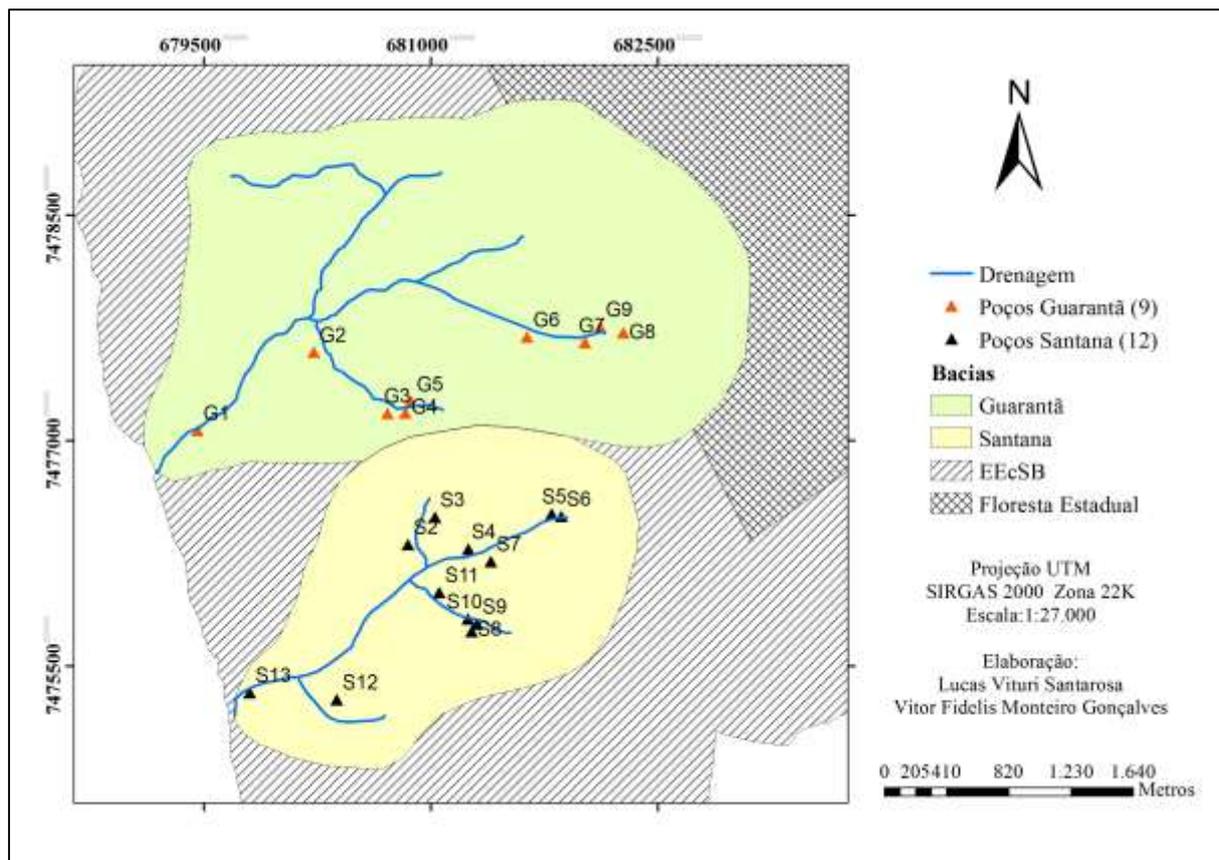


Figura 2: Localização dos poços de monitoramento

Segundo Scanlon et al. (2002), O método *da Variação do Nível Freático* (WTF) parte da premissa de que os aumentos nos níveis da água subterrânea em aquíferos não confinados estão diretamente ligados à água que atinge o nível freático. O método é melhor aplicado em períodos de tempo curtos em aquíferos com níveis de água não profundos, entretanto pode também ser utilizado para a análise da magnitude da mudança no nível relacionado ao clima ou uso da terra. A flutuação do nível freático é por sua vez a resposta à recarga média (*spatially averaged recharge*). A equação 2 é a utilizada por tal método:

$$R = S_y \frac{\Delta H}{\Delta t} \quad (2)$$

Visto que, R é a recarga, S_y corresponde ao coeficiente de rendimento específico do aquífero, H é a altura do nível freático e t é o tempo de ocorrência. O ΔH será determinado através da diferença entre o pico de ascensão e a base da linha extrapolada da última curva de recessão (Figura 3), este valor é adicionado a fórmula, gerando o valor de recarga parcial, e quando todas as ascensões de nível forem calculadas, é obtida a recarga total. (Healy, 2010).

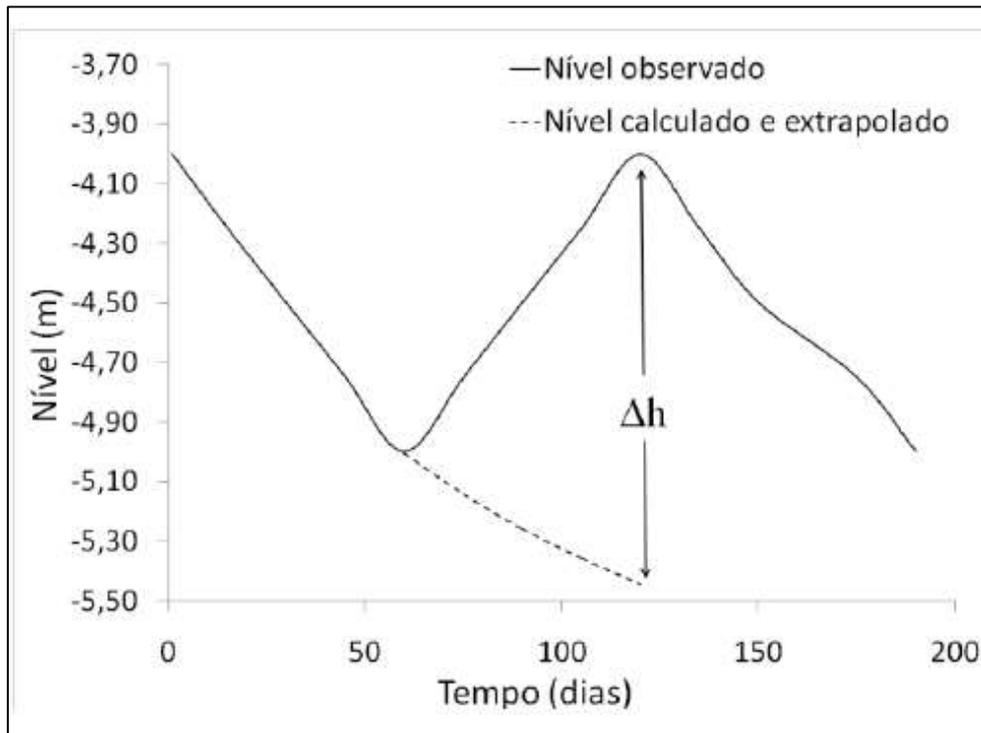


Figura 3: Hidrográfa hipotética de água subterrânea, mostrando a diferença entre o pico e a linha extrapolada (MANZIONE, 2015).

O método utilizado para interpolar os dados de recarga obtidos a partir do método da variação da superfície livre (WTF) foi o Inverso do Quadrado da Distância (IDW). O Inverso da distância é um interpolador que estima um ponto de acordo com a vizinhança, e a média para a estimativa é ponderada pela distância entre os vizinhos e o ponto a ser estimado. Assim, os pontos mais próximos com os pontos amostrados possuem valores mais parecidos do que aqueles mais distantes. Além disso, pode-se utilizar potências no método, mudando a taxa de decréscimo da função de ponderação, a partir da seguinte fórmula (MIRANDA,2010):

$$\hat{v} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d_1^p}\right) * v_i / \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d_1^p}\right) \quad (1)$$

Onde, p é a potência de distância, no caso deste trabalho foi utilizado a potência quadrado, sendo assim, o inverso do quadrado da distância.

Para auxiliar na análise dos resultados, um mapa de altimetria foi elaborado para a área através de dados da missão SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) (Figura 4), assumindo

que o nível potenciométrico em aquíferos livres é uma réplica moderada da superfície do terreno (DESBARATS et al., 2002), portanto, o conhecimento da altimetria permite realizar uma análise mais detalhada para interpretação da dinâmica da água subterrânea.

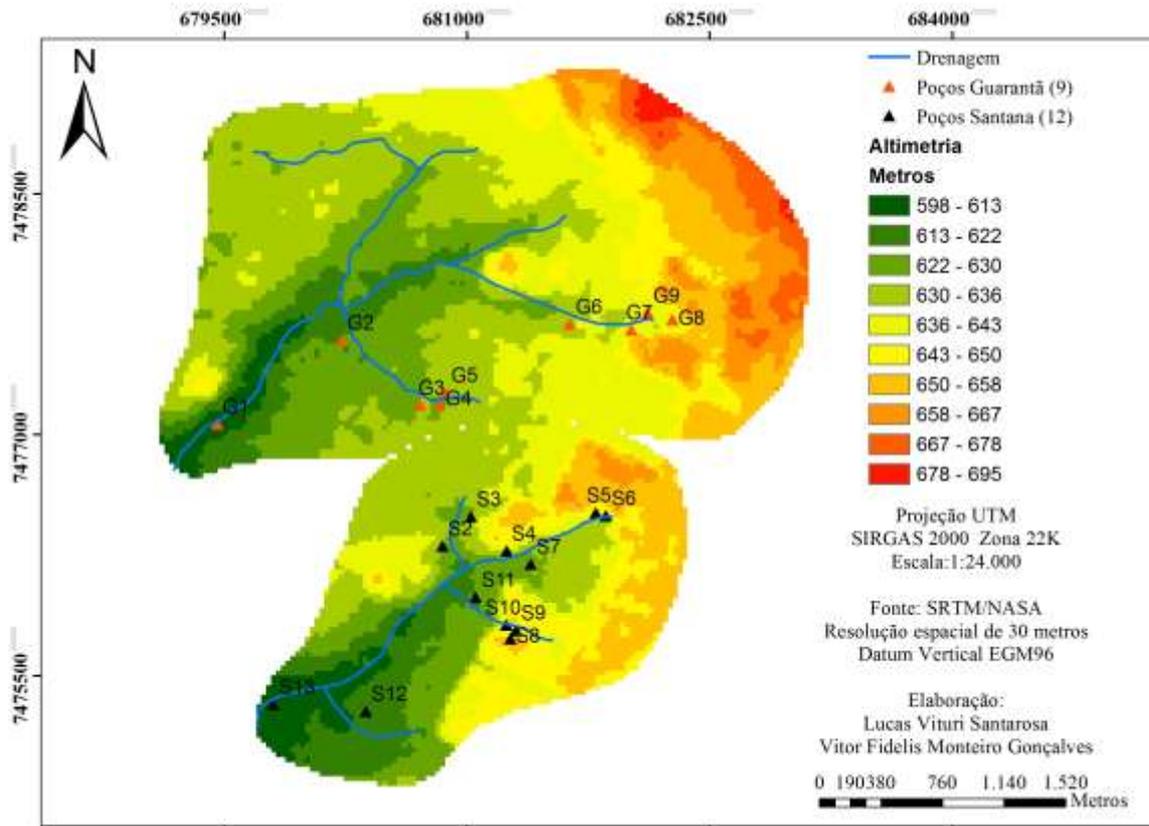


Figura 4: Altimetria nas bacias hidrográficas do Guarantã e Santana

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para realização do cálculo dos valores de recarga para cada poço, o rendimento específico utilizado para o trabalho foi de 12% para o aquífero Bauru como proposto por Velásquez et al. (2008).

Foram gerados gráficos com a oscilação do nível freático para cada poço (Figura 5), observou-se pontos de rebaixamento do nível, onde foram criadas as curvas de recessão para cada redução do nível identificada. A diferença entre o final da curva de recessão e o pico do nível freático (Δh), dividido pelo tempo decorrido (Δt), no caso o número de dias que se passaram no período de recessão (Figura 6). O valor obtido foi multiplicado pelo rendimento específico e novamente multiplicado pelo Δt , gerando os valores de recarga.

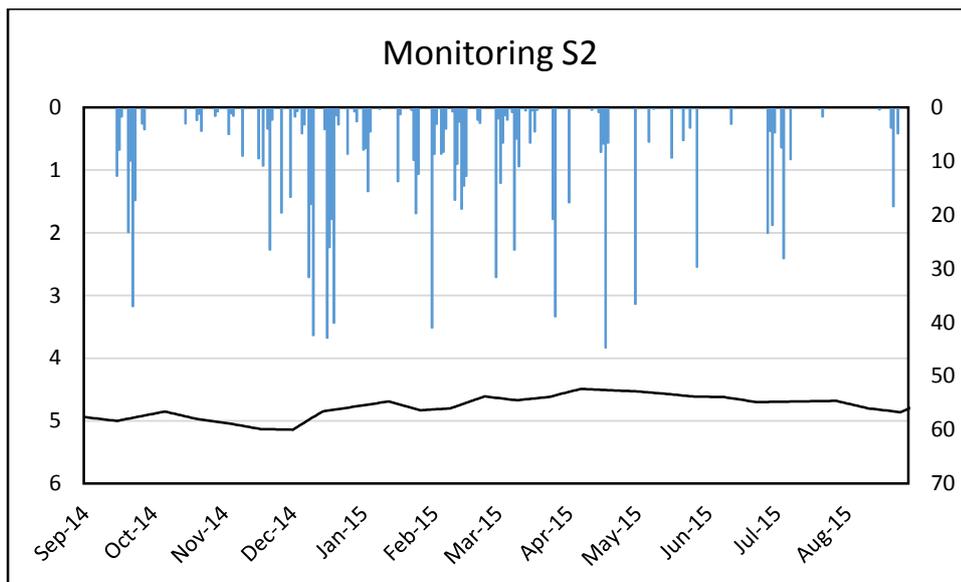


Figura 5: Exemplo de Gráfico da oscilação do nível freático e a precipitação.
(Poço S2)

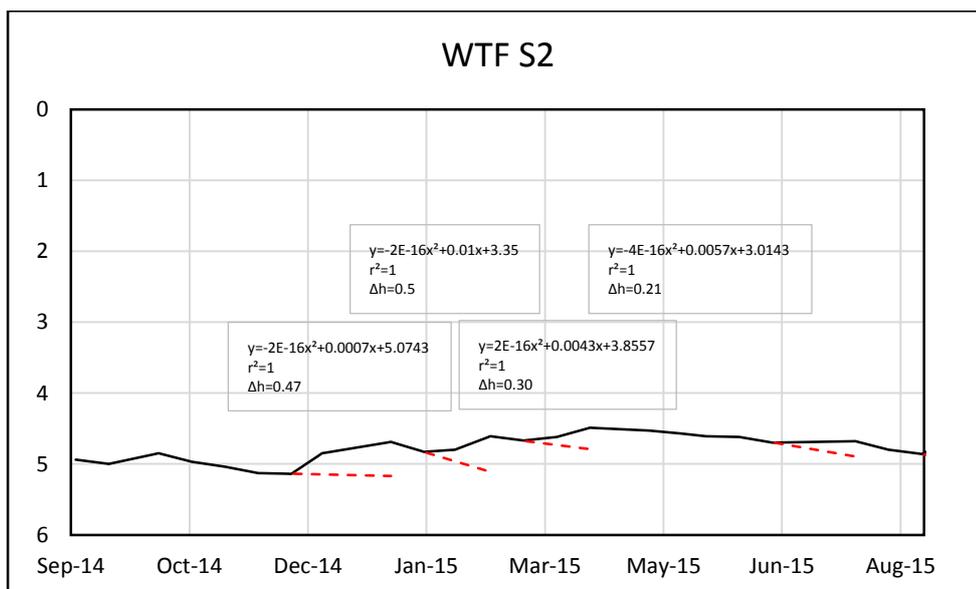


Figura 6: Gráfico WTF para o poço S2

Com a utilização da metodologia proposta foram calculados os valores de recarga de cada poço (Tabela 2).

Tabela 2 – Recargas (mm) para os poços analisados

Guarantã		Santana	
Poço	Recarga (mm)	Poço	Recarga (mm)
G1	106,5	S2	179,5
G2	228	S3	196,08
G3	239,1	S4	182,64
G4	262,6	S5	172,5
G5	289,3	S6	184,3
G6	231,7	S7	180,1
G7	286,6	S8	231,2
G8	240	S9	199,9
G9	136,9	S10	128,7
		S11	404,5
		S12	331,2
		S13	163,44

Observa-se que a maior parte dos valores de recarga calculado se aproximam do valor médio de 220,9 mm, exceto nos poços G1, G9, S10 que apresentam valores muito abaixo da média e os poços S11 e S12 que apresentam valores muito acima da média.

Os valores de recarga foram interpolados para elaborar o mapa da recarga para as Bacias hidrográficas do Guarantã e do Santana (Figura 7).

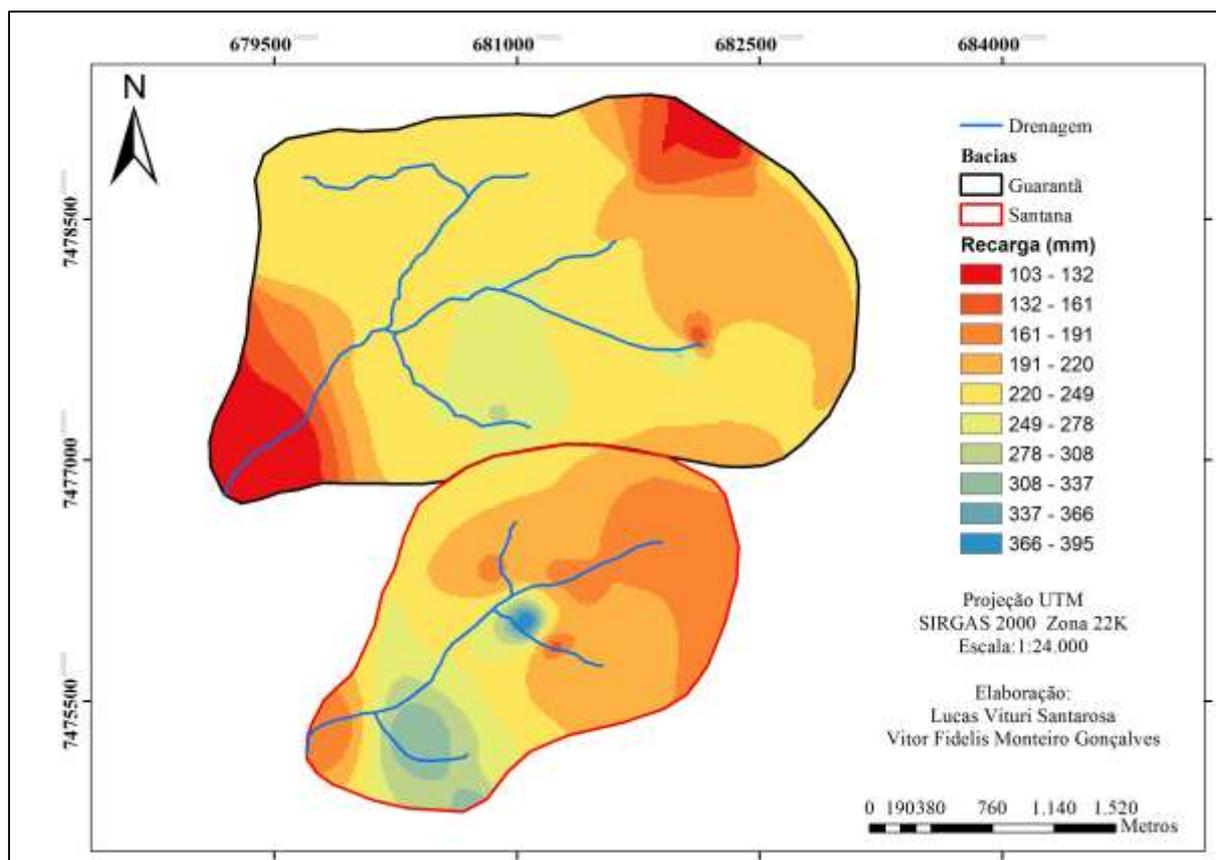


Figura 7: Recarga para o ano hidrológico 2014/2015 nas bacias hidrográficas do Guarantã e Santana.

Ao fazer a comparação entre os dados de recarga e da altimetria (Figura 7), verifica-se que a recarga é maior no centro das bacias e menor nas regiões mais elevadas, região dos interflúvios, e mais baixas, próximo ao exutório das bacias. É possível inferir que estes valores de recarga respondem ao fluxo de água subterrânea. Essas regiões intermediárias recebem a água das regiões mais elevadas e, devido a umidade concentrada nas áreas mais baixas (próximas ao rio Capivari que recebe as águas do Guarantã e do Santana), faz com que o fluxo seja mais lento, favorecendo a ocorrência de recargas maiores na região central das bacias.

Outra constatação pode ser observada nos pontos de maior recarga, poços S11 e S12, concentrados próximos a uma lagoa, caracterizando assim uma possível recarga pontual, por ser um ponto onde a água acumula no terreno e favorece a infiltração. A SP-280, Rodovia Castelo Branco, passa pela região sul da área de estudo, e por ser uma grande estrutura compactada, serve como uma barragem para o fluxo tanto superficial, como subterrâneo. Assim é possível observar acúmulos de água em superfície próximos a rodovia. Estes acúmulos se encontram próximos aos poços S11 e S12.

A Tabela 3 apresenta a porcentagem da recarga em relação a precipitação, registrada na estação meteorológica da área, permite estabelecer a relação entre a precipitação e a recarga em milímetros.

Tabela 3 – Porcentagem de recargas pela Precipitação por poço para cada Bacia Hidrográfica

Guarantã		Santana	
G1	0,064573	S2	0,108834
G2	0,138240	S3	0,118887
G3	0,144971	S4	0,110738
G4	0,159219	S5	0,104590
G5	0,175408	S6	0,111744
G6	0,140484	S7	0,109198
G7	0,173771	S8	0,140181
G8	0,145516	S9	0,121203
G9	0,083005	S10	0,078033
		S11	0,245256
		S12	0,200812
		S13	0,099097

Na tabela, podemos observar que os poços variam de 6 a 24 %, na área analisada. Sendo que as recargas próximas a 20%, estão localizadas em dois pontos específicos da Bacia do Santana. Os dados ainda foram analisados estatisticamente através de uma distribuição normal (Figura 8).

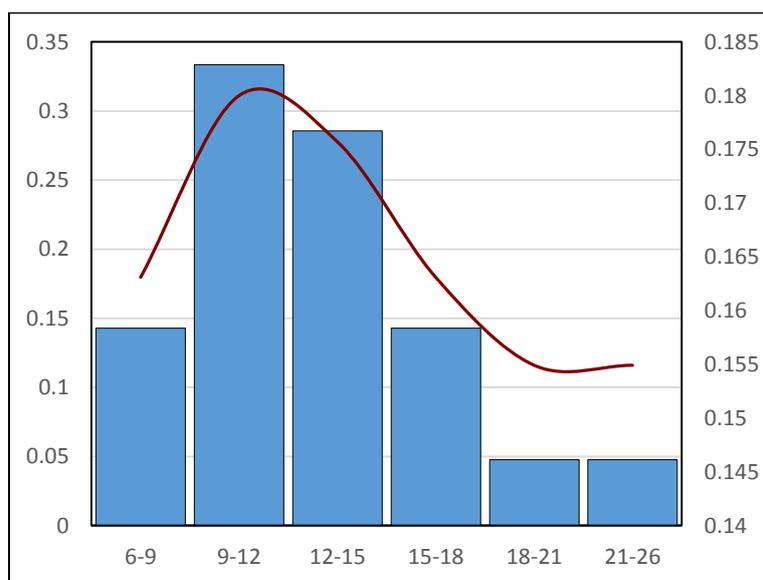


Figura 8 – Distribuição normal da recarga

Com esse gráfico, é possível observar que a maioria das amostras analisadas estão entre 9 e 15%, avaliando que a normalidade para a recarga nesta área está nesse intervalo.

Se considerarmos a área das bacias conjugadas de 11.870.442,48 m², e assumirmos que a média das recargas é de 220,9 mm, obtemos que o volume de recarga para a região é de 2.587.341.866,14 litros. Ainda, foi utilizada a média da recarga por pixel analisado em ambiente SIG que é de 218,23 mm, e esse valor foi multiplicado pela área de cada pixel, para obter o valor da recarga para área que foi de 2.590.341.866, 14 litros. Isto demonstra que a interpolação é satisfatória quanto ao volume de recarga e poder utilizada para selecionar locais mais propícios para captação de um volume de água para determinado uso.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O método, já convencional para a medição, quando utilizado em aquíferos não confinados, se mostra eficiente em demonstrar a relação entre a precipitação e a altura do nível freático em regiões de clima mais úmido. Com os gráficos gerados é possível observar a dinâmica do aquífero livre e sua produção de água, ou seja, o total de água, seja superficial ou subterrânea, processada por uma bacia hidrográfica, insurgente em seu curso principal.

Constatou-se que com o conhecimento da dinâmica da oscilação do nível freático é possível reunir dados capazes de facilitar o planejamento do uso da água subterrânea. Com o conhecimento dos valores médios de precipitação que contribuem diretamente para recarga do aquífero na região pode-se fazer o dimensionamento da recarga para planejar ações em áreas com características semelhantes a EECSB, desde que sejam realizadas as medições da precipitação. Esta generalização pode ser tomada como medida paliativa na ausência de uma rede de poços de monitoramento. Entretanto, os dados apresentados necessitam de uma série temporal maior para que as dinâmicas das águas subterrâneas possam ser compreendidas com menor incerteza possível.

Referências bibliográficas

ADHIKARY, S. K.; CHAKY, T.; DAS GUPTA, A.; RAHMAN, M. M. **Estimating Shallow groundwater recharge from precipitation and water levels observations**. Proceedings of the 1st International Conference on Civil Engineering for Sustainable Development, 2012.

BAKKER, M.; BARTHOLOMEUS, R. P.; FERRÉ, T. P. A. Preface: Groundwater recharge: processes and quantification. **Hydrology and Earth System Sciences**. Vol. 17 (7). Págs.2653-2655, 2013.

DESBARATS, A. J. et al. On the kriging of water table elevations using collateral information from a digital elevation model. **Journal of Hydrology**, v. 255, n. 1–4, p. 25–38, 2 jan. 2002.

DRUCK, S. et al. **Análise espacial de dados geográficos**. Planaltina: Empraba Cerrados, 2004. XXX p.

HAYASHI, M.; FARROW, C. R. **Watershed-scale response of groundwater recharge to inter-annual and inter-decadal variability in precipitation (Alberta, Canadá)**. Hydrogeology Journal. v.22, p. 1825-1839. 2014.

HEALY, R. W. **Estimating groundwater recharge**. Cambridge University Press, UK. 2010. 245 págs.

HORNERO, J. et al. **Integrating soil water and tracer balances, numerical modelling and GIS tools to estimate regional groundwater recharge: Application to the Alcadozo Aquifer System (SE Spain)**. Science of The Total Environment, v. 568, p. 415–432, 15 out. 2016.

MELO, A. C. G., DURIGAN, G. **Estação Ecológica de Santa Bárbara: Plano de Manejo**. Instituto Florestal/Secretaria do Meio Ambiente. 2011. Disponível em: http://www.ambiente.sp.gov.br/consema/files/2011/11/oficio_consema_2010_121/Plano_de_Manejo_da_Estacao_Ecologica_Santa_Barbara.pdf. Acesso em: 20 de Fevereiro de 2015.

MIRANDA, J. I. **Fundamentos de Sistemas de Informações Geográficas – 2.ed.rev.ataul.** – Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2010.425p.

MANZIONE, R. L. **Águas subterrâneas: Conceitos e aplicações sob uma visão multidisciplinar**. Jundiaí, Paco editorial: 2015. 386 p.

PRADA, S; CRUZ, J. V.; FIGUEIRA, C. **Using isotopes to characterize groundwater recharge sources in the volcanic island of Madeira, Portugal**. Journal of Hydrology. Vol.536. Págs. 409-425.2016.

SCANLON, B. R.; HEALY, R. W.; COOK, P. G. **Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge**. Hydrogeology Journal, Vol. 10. Issue 2. Págs. 18-39.2002.

VELÁSQUEZ, L. M. N.; BRANCO, O. E. A.; CARVALHO FILHO, C. A.; MINARDI, P. S. P.; COTA, S. D. S.; BOMTEMPO, V. P.; CAMARGOS, C. C.; RODRIGUES, P. C. H.; FIUMARI, S. L. **Caracterização Hidrogeológica dos Aquíferos Bauru e Serra Geral e avaliação das reservas do Aquífero Bauru no município de Araguari, Minas Gerais**. In: Anais do XV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, Natal, 2008.

WENDLAND, E.; BARRETO, C.; GOMES, L. H. **Water Balance in Guarani Aquifer outcrop zone based on hydrogeologic monitoring**. Journal of Hidrology, 2007. Pags. 261-269. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169407003034>. Acesso em: 02 de Março de 2015.