



IMPACTOS DO CLIMA NO COMPORTAMENTO DE NÍVEIS FREÁTICOS EM ÁREA DE CONSERVAÇÃO UTILIZANDO UM MODELO AUTOREGRESSIVO DE SÉRIES TEMPORAIS

R. L. Manzione*

UNESP – Univ Estadual Paulista, Campus de Ourinhos, Ourinhos, SP, Brasil

Article history: Received 02 June 2017; Received in revised form 12 June 2017; Accepted 14 June 2017; Available online 30 June 2017.

RESUMO

Entre 2013 e 2016, o Estado de São Paulo passou por dois períodos marcantes de anomalia climática, presenciando uma das piores secas já registradas e posteriormente os efeitos do fenômeno El Niño Oscilação Sul (ENOS), trazendo impactos diretos nos recursos hídricos. O objetivo desse trabalho foi investigar o comportamento dos níveis freáticos frente a essas anomalias climáticas na Estação Ecológica de Santa Barbara (EEcSB). A partir de dados climatológicos e de níveis freáticos observados entre setembro de 2014 e agosto de 2016, aplicou-se um modelo de séries temporais modelo autoregressivo (modelo HARTT) para capturar a resposta dos níveis em função do clima. Foram calculados os tempos de resposta dos níveis em função de entradas no sistema e tendências de elevação dos níveis ao longo do tempo. Os estímulos climáticos influenciaram o comportamento dos níveis que apresentam uma resposta rápida, com uma influência marcada pela precipitação e tendências de elevação no período estudado. Essas informações são importantes para gestão dos recursos hídricos subterrâneos, planejamento de atividades que dependam da água, parcelamento do solo e estudos sobre a capacidade de suporte de áreas quanto aos seus recursos naturais.

Palavras-chave: modelagem estocástica, águas subterrâneas, modelo HARTT

CLIMATE IMPACTS ON WATER TABLE LEVELS BEHAVIOR IN A CONSERVATION AREA USING AN AUTOREGRESSIVE TIME SERIES MODEL

ABSTRACT

Between 2013 and 2016, São Paulo State, Brazil, passed through two marked periods of climatic anomalies, facing one of the worst droughts ever recorded and later the effects of El Niño South Oscillation (ENSO) phenomena, bringing direct impacts on water resources. The aim of this study was to investigate the behaviour of water table depths from these climatological anomalies in the Ecological Station of Santa Barbara, municipality of Águas de Santa Barbara (SP), Brazil. From climate data and water table depths observed from September 2014 to August 2016, an autoregressive time series model (HARTT model) was tested to capture the response of groundwater levels due to climatological inputs. We calculate response times from system inputs and trend of elevation in water levels along time. Climatological inputs influenced the behaviour of water table levels that presented a fast response, with marked influence of precipitation and trend of elevation during the monitoring period. This information is important for groundwater management, water dependable activities planning, land use parcelling and studies about the natural resources capacity of specific areas.

Keywords: stochastic modelling, groundwater, HARTT model

* rmanzione@gmail.com

INTRODUÇÃO

O uso da água muitas vezes é feito de maneira contínua, não respeitando as variações sazonais e o modo como afetam a recarga dos aquíferos. Os dados de monitoramento são particularmente interessantes ao se analisar características de processos, pois podem revelar não só padrões temporais, mas também distribuições espaciais e variações ao longo do tempo quando coletados em redes geoespaciais. Frequentemente, alterações no ciclo hidrológico e nos recursos hídricos disponíveis possuem influências em nível regional, municipal, estadual e até mesmo federal, e não apenas no nível da bacia hidrográfica (HOFFMANN & JACKSON, 2000).

Prever a resposta de um aquífero (em termos de quantidade e qualidade) quanto às atividades de exploração propostas e em tempo hábil para gerar políticas racionais de exploração em determinada região é uma questão complicada, devido à complexidade dos processos envolvidos (MANOEL FILHO, 2008). Isso faz com que muitas vezes a gestão de águas subterrâneas muitas vezes não seja incluída no planejamento e gestão de recursos hídricos. O monitoramento da água disponível em um aquífero possibilita diagnosticar o atual estado do aquífero, em relação aos estados passados, para tomar as devidas medidas em relação a modificações causadas por efeitos naturais e/ou antrópicos. Assim, o volume explorável de um aquífero é uma variável de decisão a ser determinada como parte de um plano de gestão do sistema de águas de uma região. Só que para isso é necessário conhecer a dinâmica das águas subterrâneas e identificar os processos que influenciam a oscilação dos seus níveis. A avaliação do comportamento do aquífero através do monitoramento, principalmente nas áreas de afloramento, fornece dados importantes para sua conservação e subsídios aos projetos de proteção ambiental e desenvolvimento sustentável (OAS/GEF, 2001), assegurando a qualidade e a quantidade de seu manancial.

Através do monitoramento e posteriormente pela análise dos dados em modelos hidrológicos, pode-se entender melhor o comportamento dos aquíferos.

Em muitos processos ambientais são encontrados estados onde um determinado instante no tempo é correlacionado com o estado em um determinado tempo passado. Esse tipo de processo é chamado autoregressivo (AR). O AR (p) ocorre quando as observações da série são dependentes entre si, e esta dependência tende a se perder com o afastamento da primeira observação até o ponto que os dados se tornam ruídos brancos (aleatórios). Quando a ordem do processo é um (1), este é chamado de Processo de Markov (MANZIONE, 2015). O monitoramento das águas subterrâneas é instrumento fundamental para a avaliação das condições que este meio natural se encontra, e posteriormente poder tomar medidas preventivas e/ou proativas para o predomínio da qualidade e quantidade, buscando desenvolver o uso sustentável junto a uma ação integrada de gerenciamento. O monitoramento das águas subterrâneas deve incluir a coleta, o armazenamento, a análise e interpretação dos dados (MESTRINHO, 2008). Isso inclui formalização de subsídios aos gestores, com base nos diagnósticos, visando a tomada de decisões. A coleção de dados de monitoramento requer tratamento com métodos estatísticos, cartográficos, gráficos e modelagem. Portanto após um período de monitoramento os dados são analisados estatisticamente e as incertezas são consideradas, e com isso pode-se analisar do ponto de vista técnico-ambiental e socioeconômico para a tomada das devidas decisões e revisão dos objetivos da rede de monitoramento (MOORE, 2012).

O objetivo desse trabalho foi analisar os mecanismos de oscilação dos níveis freáticos em uma área de conservação em Águas de Santa Barbara/SP, afetados principalmente pela sazonalidade do regime pluviométrico

através da calibração de modelos autoregressivos de séries temporais para compreensão da natureza do fenômeno e explicar sua dinâmica em função das

anomalias climáticas ocorridas no Estado de São Paulo durante período de monitoramento entre setembro de 2014 e agosto de 2016.

MATERIAL E MÉTODO

Caracterização geológica da região de estudo

O derrame vulcânico continental da Bacia do Paraná é composto, em mais de 90% em volume, por basaltos toleíticos e andesito basáltico, apresentando vesículas e amídalas no topo e na base do derrame. Intercalados aos sucessivos derrames, localmente, há depósitos de arenitos eólicos, formando um sistema intertrapeano (MEAULO, 2004). Cessados os derrames de lava da Formação Serra Geral que marcaram o final dos eventos deposicionais e vulcânicos generalizados na área da bacia do Paraná, observou-se uma tendência geral para o soerguimento epirogênico em toda a Plataforma Sul-Americana, em território brasileiro (CPTI, 1999). A porção norte da bacia, entretanto, comportou-se como área negativa, relativamente aos soerguimentos marginais à zona central da bacia, marcando o início de uma fase de embaciamentos localizados em relação à área da bacia como um todo. Nessa área deprimida acumulou-se o Grupo Bauru, no Cretáceo superior, aparecendo em grande parte do oeste do Estado de São Paulo (CPTI, 1999).

Segundo SUGUIO (1980), o Grupo Bauru abrange as unidades estratigráficas: Formação Caiuá, Formação Santo Anastácio, Formação Araçatuba, Formação São José do Rio Preto, Formação Uberaba e Formação Marília. Segundo IPT (1981), o Grupo Bauru é subdividido em quatro formações: Caiuá, Santo Anastácio, Adamantina e Marília. Na região em estudo, as unidades litoestratigráficas presentes são constituídas por rochas ígneas (pertencentes à Formação Serra Geral) e rochas sedimentares (da Formação Adamantina e Marília), ambas de idade predominantemente mesozoica. A Formação Adamantina aflora em vasta extensão do oeste paulista, recobrando as

unidades pretéritas do Grupo Bauru (Formações Caiuá e Santo Anastácio) e Formação Serra Geral. Em algumas regiões esta formação é recoberta em parte pela Formação Marília e em parte por depósitos cenozoicos. Esta unidade estratigráfica contempla 41,45% de área aflorante no Médio Paranapanema (BONGIOVANNI, 2008). O contato entre a Formação Adamantina e os basaltos da Formação Serra Geral é marcado por discordância erosiva, apresentando algumas vezes delgados níveis de brecha basal.

Estação Ecológica de Santa Bárbara (EEcSB)

A EEcSB está localizada à Rodovia SP 261 – km 58, coordenadas 22°48'59" S e 49°14'12" O, no município de Águas de Santa Bárbara/SP (Figura 1). Foi regulamentada pelo Decreto 22.337 de 07 de junho de 1984 que instituiu sua formação com uma área de 4.371 hectares dentro dos limites da Floresta Estadual de Santa Bárbara, dos quais apresentam uma área 2.712 hectares de vegetação nativa (Cerrado, brejos e mata de galeria) dividindo o espaço com o reflorestamento com pinus e eucalipto.

As formações geológicas na região são os arenitos da Formação Adamantina e da Formação Marília, pertencentes ao Grupo Bauru, com predomínio da formação Adamantina na EEcSB (MELO & DURIGAN, 2011; CPRM, 2006). Segundo o Mapa Geológico do Estado de São Paulo (IPT, 1981) a formação Adamantina é caracterizada como depósitos fluviais com predominância de arenitos finos, podendo apresentar cimentação e nódulos carbonáticos, com lentes de siltito arenosos e argilosos, ocorrendo em bancos maciços. Estratificação plano paralela e cruzada de

pequeno e médio porte. A Formação Marília apresenta arenitos de granulação fina a grossa, compreendendo bancos maciços com tênues estratificações cruzadas de médio porte, incluindo lentes e intercalações subordinadas à siltitos, argilitos e arenitos muito finos com estratificação plano paralela e frequentes níveis rudáceos e presença comum de nódulos carbonáticos. Existe ainda a ocorrência da formação Serra Geral de origem ígnea, extrusiva, formada por derrames de lavas basálticas, originando rochas de granulação muito fina, coloração cinza a preta.

Segundo informações que constam no Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo elaborado por ROSS & MOROZ (1996), a EECSB encontra-se localizado na Bacia Sedimentar do Paraná (morfoestrutura) e no Planalto Ocidental Paulista (morfoescultura), com formas de relevo predominantemente de colinas amplas e baixas, com altimetria em torno de 300 a 600 metros, e declividade variando entre 10 a 20%. Sua topografia consiste de um relevo de colinas amplas, com altitudes entre 600 e 680 m.

As formas de relevo combinada a formações rochosas predominantes, possibilita a ocorrência de Latossolos Vermelhos (LV56) e Argissolos Vermelhos-Amarelo e Vermelho (PVA10) eutróficos e distroféricos com textura arenosa/média e Nitossolos (NV1) eutróficos com textura argilosa (OLIVEIRA *et al.*, 1999) na região da EECSB. O solo predominante nos domínios da EECSB é o Latossolo Vermelho (LV56).

Os Latossolos, segundo EMBRAPA (2006), são solos formados por material mineral apresentando o horizonte diagnóstico B latossólico em estágio de evolução muito avançada o que resulta em intensa intemperização de minerais primário e secundários. São, em geral, solos com boas propriedades físicas, situados, na maioria dos casos, em relevo favorável ao uso de máquinas agrícolas. São solos de excepcional porosidade total e, conseqüentemente, de boa drenagem interna, na EECSB apresenta textura média a arenosa devido ao embasamento rochoso. SANTAROSA (2016) realizou um levantamento na área da EECSB analisando textura e granulométrica de 113 amostras de solo compostas coletadas de 20 a 100 cm de profundidade (EMBRAPA, 1997). Os valores da granulometria, representados pelo percentual de areia e argila contida nas amostras, mostrou que a textura do solo é predominantemente arenosa, com porcentagem de areia de 73% a 94%. O fracionamento da areia revelou a predominância de areia de granulometria média e fina. SANTAROSA (2016) deduziu segundo esses resultados uma aproximação das características granulométricas identificadas como solo da classe dos Neossolos Quartzarênicos, caracterizados pela textura predominante de areia ou areia franca e ausência de minerais primários (EMBRAPA, 2006). O autor salienta que esta constatação necessita de uma análise mais profunda para confirmar esta caracterização, sugerindo um mapeamento detalhado da área de estudo.

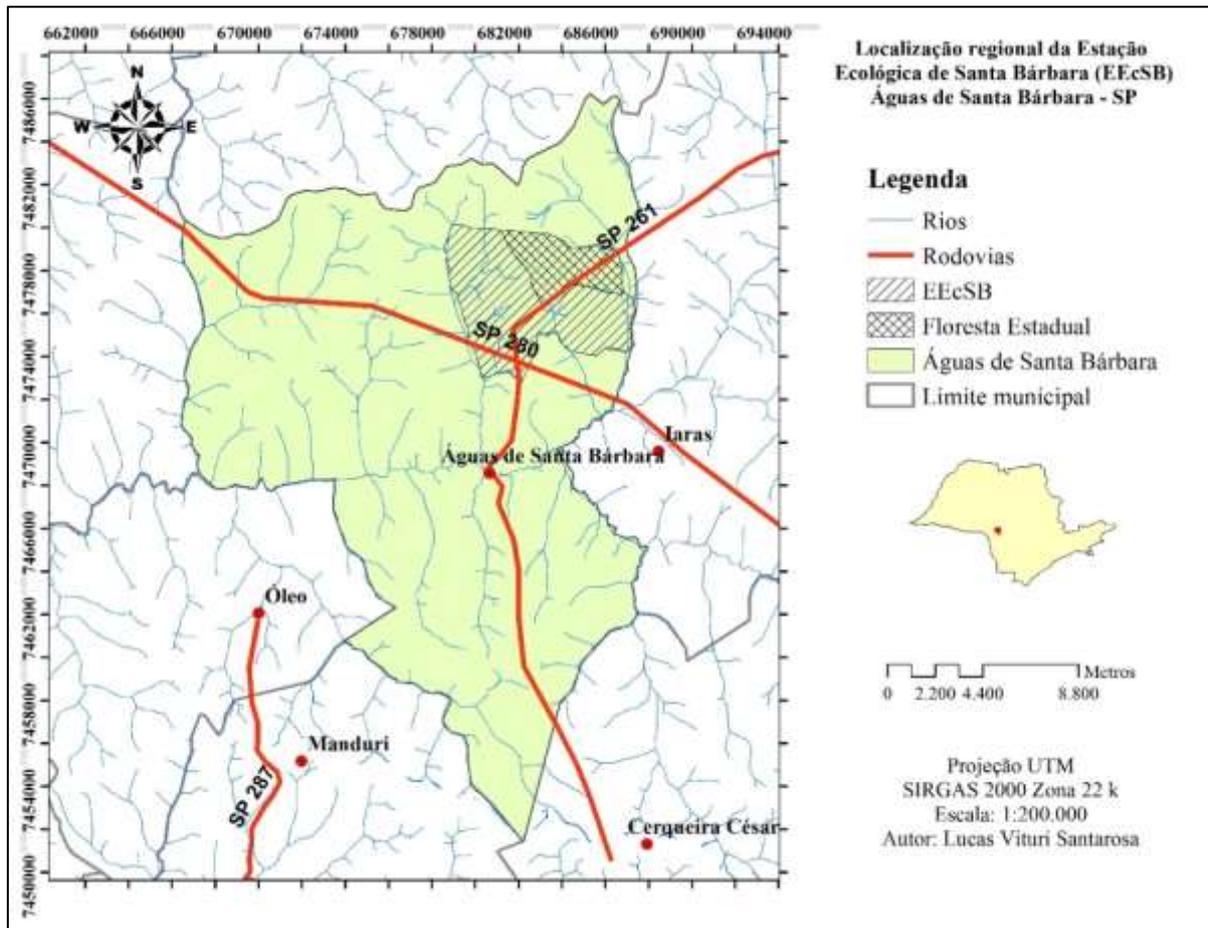


Figura 1. Localização da EEcSB e da Floresta Estadual nos limites do município de Águas de Santa Bárbara (SP). Fonte: SANTAROSA (2016)

O clima característico da região, segundo a classificação de Köppen, é Cwa ou tropical subúmido (clima quente com inverno seco), apresentando temperaturas de 16°C no mês mais frio e 23°C no mês mais quente (CEPAGRI, 2016). As precipitações anuais estão em torno de 1000- 2086 mm, podendo chegar a 30 mm mensais no inverno. A temperatura média anual está em torno de 18°C, com máximas em janeiro entre 22°C e 30°C e mínimas no mês mais frio 18°C (MELO & DURIGAN, 2011).

A EEcSB é margeada a leste pelo Rio Capão Rico e, a oeste, pelo Rio Capivari. Ambos os rios nascem fora da Unidade de Conservação e o margeiam, sendo os maiores corpos de água em contato com a EEcSB (HONDA & NIZOLI, 2005). Inúmeros corpos de água nascem no interior dessa unidade de conservação, muitos dos quais secam durante o período de estiagem. Toda a área

faz parte da unidade hidrográfica do Rio Pardo, integrante da bacia hidrográfica do Rio Paranapanema (UGRHI-17). A EEcSB localiza-se sobre o Sistema Aquífero Bauru (SAB), um sistema aquífero sedimentar de extensão regional que ocupa a maior parte da região oeste do território do Estado de São Paulo, com uma área aproximada de 96 mil km² (IRITANI & EZAKI, 2008). O SAB representa uma das reservas hídricas mais importantes do Estado, servindo como fonte de abastecimento público para muitos municípios. Na região do Médio Paranapanema (UGRHI-17) o SAB é utilizado para suprir 75% da sua demanda socioeconômica (FIESP, 2005). De acordo com SILVA *et al.* (2005), o SAB é formado pelos aquíferos Marília, Adamantina, Birigui, Santo Anastácio e Caiuá, e os aquíferos Araçatuba e Pirapozinho. Na EEcSB, o aquífero Adamantina é predominante, considerado livre a semiconfinado e contínuo

apresentando um comportamento hidráulico bastante heterogêneo e anisotrópico, mesmo em localidades relativamente próximas, devido a variações das concentrações de argila nos arenitos (SILVA, 2003). As características gerais do SAB apresentam porosidade efetiva de 5% a 15%; transmissividade de 10 a 300 m²/dia; permeabilidade de 0,1 a 3,0 m/dia; capacidade específica entre 0,02 m³/h/m a 4,9 m³/h/m; condutividade hidráulica de 0,02 a 3,66 m/dia e; vazão média explorável em torno de 80 m³/h (DAEE/IG/IPT/CPRM, 2005).

A região da EECsB é ocupada pela vegetação nativa, campos antrópicos, vegetação em estágio de regeneração, mata ciliar e áreas de reflorestamento. O manejo na vegetação é constante, tanto para fins de produção florestal para pesquisa como para reverter à invasão pelo Pinus sobre a vegetação nativa (MELO & DURIGAN, 2011).

Dados disponíveis

- Séries temporais de monitoramento do nível freático

Para análise dos níveis freáticos, foram utilizados dados de 32 poços distribuídos nas Bacias do Guarantã (9 poços), Bugre (8 poços) Santana (12 poços) e Passarinho (3 poços). Esses poços foram perfurados entre julho e agosto de 2014, no final do inverno, posterior a seca ocorrida no verão 2013/14. Após esses eventos, imaginava-se que os níveis estariam muito baixos e os piezômetros seriam capazes de caracterizar a recuperação dos níveis assim que comesçassem as chuvas na primavera de 2014. Os poços possuem profundidade

heterogênea, variando de 2,94 a 7,68 metros. Os poços foram monitorados com uma frequência quinzenal a partir de 05 de setembro de 2014 até 29 de outubro de 2015, quando passou-se a realizar as medições de nível com frequência mensal até 02 de setembro de 2016. Essa mudança deu-se por fins econômicos, uma vez que após 1 ano monitorando os poços, percebeu-se que não haviam grandes oscilações no espaço de 2 semanas. A Figura 2 apresenta a disposição dos poços na área de estudo.

- Séries temporais de monitoramento climatológico

Os dados climatológicos utilizados nesse estudo foram séries históricas de precipitação registrada em pluviômetro na EECsB desde janeiro de 1987. São séries mensais com o total precipitado no período, resultando em 29 anos e 8 meses de observações até agosto de 2016.

Modelagem de níveis freáticos utilizando o modelo HARTT

Com o objetivo de verificar estatísticas de hidrogramas de poços para realizar análises em séries de oscilação do nível freático para correlacioná-las com eventos climáticos (precipitação), foi implementado por FERDOWSIAN *et al.* (2001) através do software HARTT (Hydrograph Analysis: Rainfall and Time Trends) um modelo autoregressivo de séries temporais é capaz de distinguir o efeito das flutuações na precipitação da tendência subjacente do nível de água subterrânea ao longo do tempo.

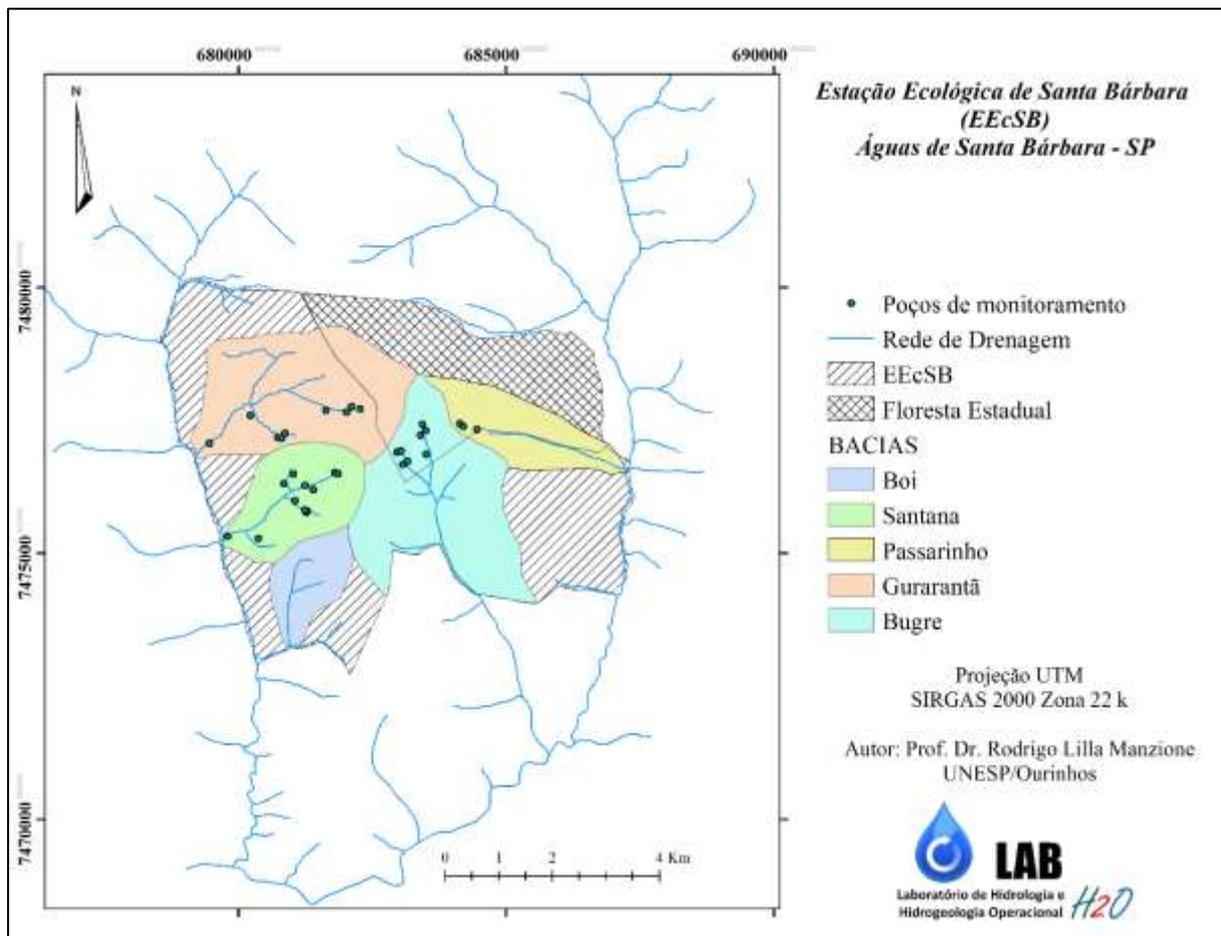


Figura 2. Distribuição dos poços de monitoramento instalados na EEcSB.

Neste modelo, a precipitação é representada como um acúmulo de desvios da precipitação média, tanto para precipitações excedentes mensais quanto anuais. O que permite a representação da defasagem (*lag*) entre a precipitação e sua perturbação no nível freático (YIHDEGO & WEBB, 2011). Segundo ALI *et al.* (2010), modelo HARTT, apresenta-se como uma derivação do método CDFM (Cumulative Deviation from the Mean), o qual se fundamenta no pressuposto de que os desvios acumulados da precipitação média explicam as mudanças nos níveis freáticos dos aquíferos não confinados. Neste método, a precipitação efetiva durante um período definido é subtraída da média de precipitação deste período.

Ambas as formas de resíduos acumulados de precipitação são utilizadas e comparadas por meio de técnicas de regressão múltipla. A primeira é a acumulativa mensal (RAPM; mm):

$$RAPM = \sum_{i=1}^t (M_{i,j} - \bar{M}_j) \quad (1)$$

onde $M_{i,j}$ é a chuva no mês i (i corresponde a um índice sequencial de tempo desde o início do conjunto de dados), o qual representa um mês do ano j^{th} ; \bar{M}_j é a média mensal de precipitação para o mês j^{th} de um ano; e t são os meses desde o início do conjunto de dados.

A variável referente ao resíduo acumulado de precipitação anual (RAPA; mm) tende a ter flutuações relativamente baixas dentro dos anos, pois em seu cálculo as flutuações na precipitação real tendem a ser compensadas pela variação sazonal apresentada pela precipitação média mensal:

$$RAPA = \sum_{i=1}^t (M_i - \bar{A}/12) \quad (2)$$

sendo, \bar{A} é a média anual de precipitação. Devido \bar{A} ser uma constante, as flutuações em M_i não são moderadas como em

RAPM, fazendo com que RAPA tenha maiores flutuações dentro do ano.

O modelo de regressão usada no HARTT é formulado como:

$$Prof_t = k_0 + k_1 * RAPM_{t-L} + k_2 * t \quad (3)$$

em que, $Prof_t$ corresponde à profundidade do nível de água abaixo da superfície; t são os meses desde o início das observações; L é a extensão do tempo de atraso (em meses) entre a chuva e seu impacto no lençol freático; e $k_0, k_1, e k_2$ são parâmetros a serem estimados.

Esta abordagem além de se apresentar eficiente para a diferenciação do efeito de uma precipitação atípica da tendência dos níveis freáticos, tem sido empregada no estudo de flutuações subterrâneas causadas por eventos de chuva em períodos selecionados de tempo;

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Análise dos efeitos da precipitação nas séries temporais e efeitos do regime pluviométrico nos níveis freáticos

Os resultados das calibrações do modelo HARTT às séries de precipitação observadas nas EECSB entre 1987 e 2016 e de alturas de nível freático observadas nos poços de monitoramento entre 05/09/2014 e 02/09/2016 podem ser vistos na Tabela 1. Os resultados dos ajustes do modelo HARTT demonstram sistemas com respostas rápidas, com pequenos atrasos da ordem de 1 a 2 meses para que ocorram respostas nos níveis a partir dos eventos de precipitação incidentes na área. Em alguns casos a resposta é imediata, sem atraso, como em alguns poços nas bacias do Guarantã, Bugre e Santana. Esses poços localizam-se próximos às nascentes dos cursos d'água que dão os nomes às bacias, áreas de descarga das águas subterrâneas. As calibrações foram consideradas boas, com valores de R^2 médios de 0,86 para a Bacia do Guarantã, 0,70 para a Bacia do Bugre, 0,75 para a Bacia do Santana e 0,88 para a bacia do Passarinho, sendo 0,78 no total dos 32 poços. Em um estudo na

de fatores que afetam os níveis de água subterrânea e na estimativa de recarga (YIHDEGO & WEBB, 2011). Por esse motivo, o modelo pode ser amplamente utilizado para estimar o impacto das alterações climáticas ou intervenção humana, tais como a mudança de uso da terra, nos níveis de águas subterrâneas (FERDOWSIAN & PANNEL, 2001). No caso de estimativas a partir de chuvas anuais recomenda-se a utilização de séries maiores que 10 anos (FERDOWSIAN et al., 2002) já que o modelo implementado no HARTT utiliza valores de precipitação acumulados em frequência mensal ou anual. Assim, com monitoramento dos níveis realizado no período, associado às séries de maior comprimento obtém-se uma série de dados de entrada que represente a oscilação climática sazonal na região.

Austrália, YIHDEGO & WEBB (2011) ajustaram o modelo HARTT para 82 poços, considerando apenas 44 como confiáveis (R^2 acima de 0,70 e valor-p < 0,05). No caso da EECSB, apenas 6 poços tiveram R^2 inferior a 0,70, sendo 3 na bacia do Bugre e 3 na Bacia do Santana.

Analisando os valores-p, 11 poços não tiveram o parâmetro $K1$ significativo estatisticamente enquanto todos os poços tiveram parâmetros $K2$ significativos. Os valores-p para o parâmetro precipitação foram mais elevados nos poços onde os ajustes apresentaram R^2 inferiores a 0,82. Nesses casos, YIHDEGO & WEBB (2011) apontam que outras variáveis podem estar influenciando os níveis freáticos além da precipitação, demandando modelos mais complexos para investigar essas relações. As Figuras 3, 4, 5 e 6 apresentam exemplos de ajustes para um poço de cada uma das bacias estudadas. Esse hidrograma mostra o cálculo com o melhor ajuste a curva ajustada e o efeito da precipitação juntamente com as leituras de níveis freáticos (FERDOWSIAN et al., 2001).

Tabela 1. Estatísticas das calibrações do modelo HARTT às séries de precipitação observadas nas EECSB entre 1987 e 2016 e de alturas de nível freático observadas nos poços de monitoramento entre 05/09/2014 e 02/09/2016.

Poço	R^2	Atraso (meses)	Intercepto	<i>K1</i>		<i>K2</i>		Taxa de elevação (m/ano)
				Precipitação (mm)	valor-p <i>K1</i>	Tempo (meses)	valor-p <i>K2</i>	
G1	0,91	1	-1,33	0,0016	0,00	0,0415	0,00	0,50
G2	0,79	0	-1,78	0,0008	0,21	0,0696	0,00	0,84
G3	0,82	0	-1,79	0,0008	0,15	0,0681	0,00	0,82
G4	0,86	0	-2,73	0,0012	0,05	0,0881	0,00	1,06
G5	0,85	0	-3,30	0,0019	0,02	0,1019	0,00	1,22
G6	0,89	1	-1,25	0,0007	0,01	0,0437	0,00	0,52
G7	0,87	1	-1,11	0,0008	0,01	0,0410	0,00	0,49
G8	0,88	2	-1,78	0,0023	0,00	0,0801	0,00	0,96
G9	0,87	2	-0,99	0,0008	0,01	0,0462	0,00	0,55
B1	0,81	1	-0,96	0,0005	0,00	0,0178	0,00	0,21
B2	0,66	1	-0,29	0,0001	0,50	0,0131	0,00	0,16
B3	0,63	1	-0,41	0,0000	0,98	0,0164	0,00	0,20
B4	0,72	0	-0,77	0,0003	0,33	0,0303	0,00	0,36
B5	0,52	0	-0,55	0,0002	0,54	0,0199	0,00	0,24
B6	0,77	1	-0,75	0,0004	0,11	0,0283	0,00	0,34
B7	0,78	1	-1,46	0,0018	0,00	0,0579	0,00	0,70
B8	0,80	1	-1,56	0,0011	0,01	0,0448	0,00	0,54
S2	0,83	1	-4,82	0,0022	0,00	0,0708	0,00	0,85
S3	0,76	0	-4,18	0,0011	0,13	0,0745	0,00	0,89
S4	0,69	0	-1,38	0,0001	0,80	0,0382	0,00	0,46
S5	0,87	2	-1,52	0,0011	0,00	0,0583	0,00	0,70
S6	0,85	2	-1,64	0,0011	0,01	0,0561	0,00	0,67
S7	0,73	1	-0,55	0,0001	0,62	0,0276	0,00	0,33
S8	0,64	2	-2,47	0,0018	0,04	0,0689	0,00	0,83
S9	0,77	1	-1,59	0,0013	0,03	0,0587	0,00	0,70
S10	0,73	1	-1,48	0,0009	0,04	0,0380	0,00	0,46
S11	0,60	0	-1,99	0,0006	0,46	0,0573	0,00	0,69
S12	0,74	1	-3,53	0,0021	0,05	0,0801	0,00	0,96
S13	0,80	0	-1,00	0,0011	0,05	0,0464	0,00	0,56
P1	0,82	1	-1,17	0,0011	0,00	0,0354	0,00	0,42
P2	0,90	2	-2,75	0,0042	0,00	0,0964	0,00	1,16
P3	0,91	2	-2,63	0,0040	0,00	0,0984	0,00	1,18

R^2 = coeficiente de determinação do modelo; valor-p = probabilidade de significância

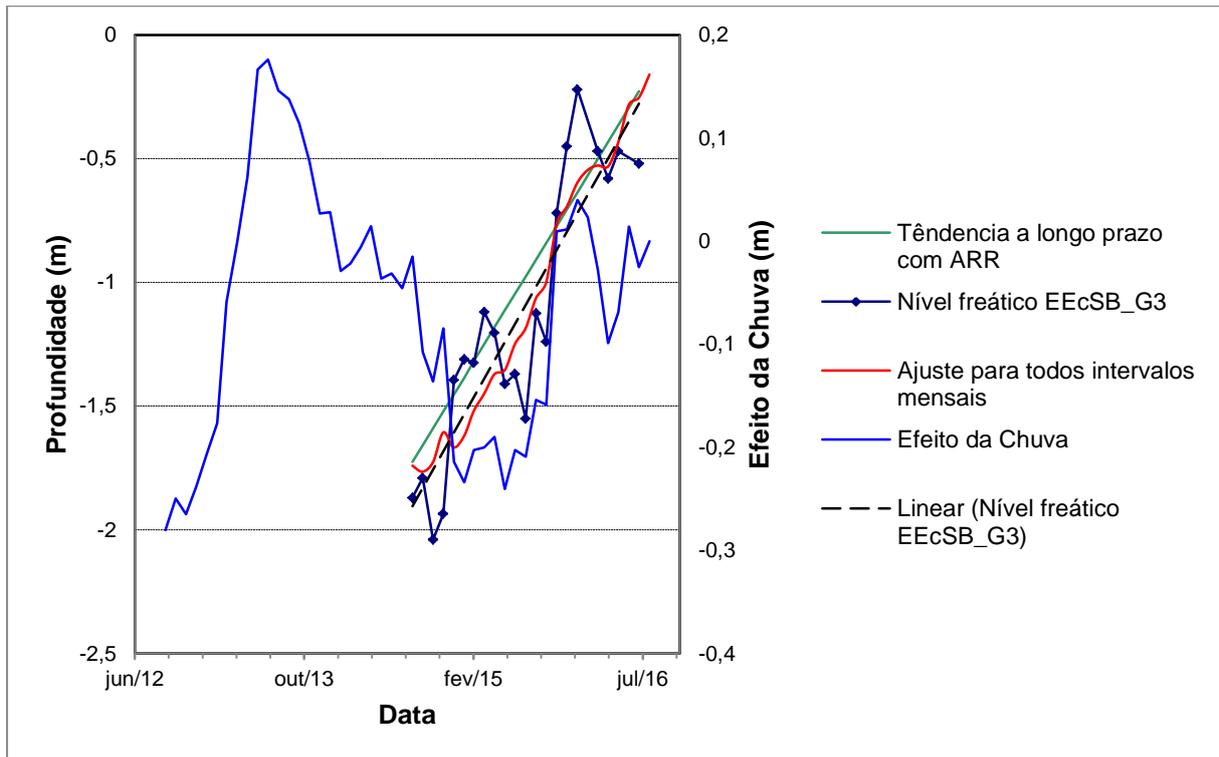


Figura 3. Ajuste do modelo HARTT à série de observações do nível freático entre 05 de setembro de 2014 e 02 de setembro de 2016 no poço G3.

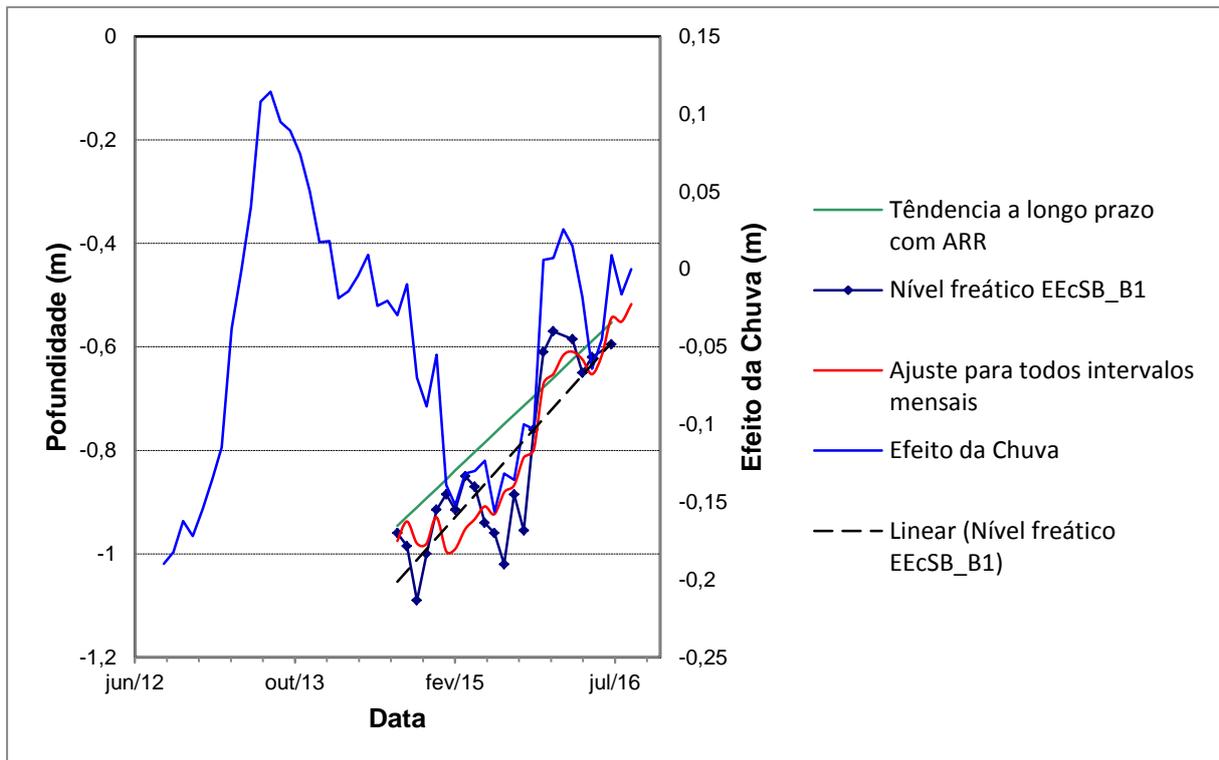


Figura 4. Ajuste do modelo HARTT à série de observações do nível freático entre 05 de setembro de 2014 e 02 de setembro de 2016 no poço B1.

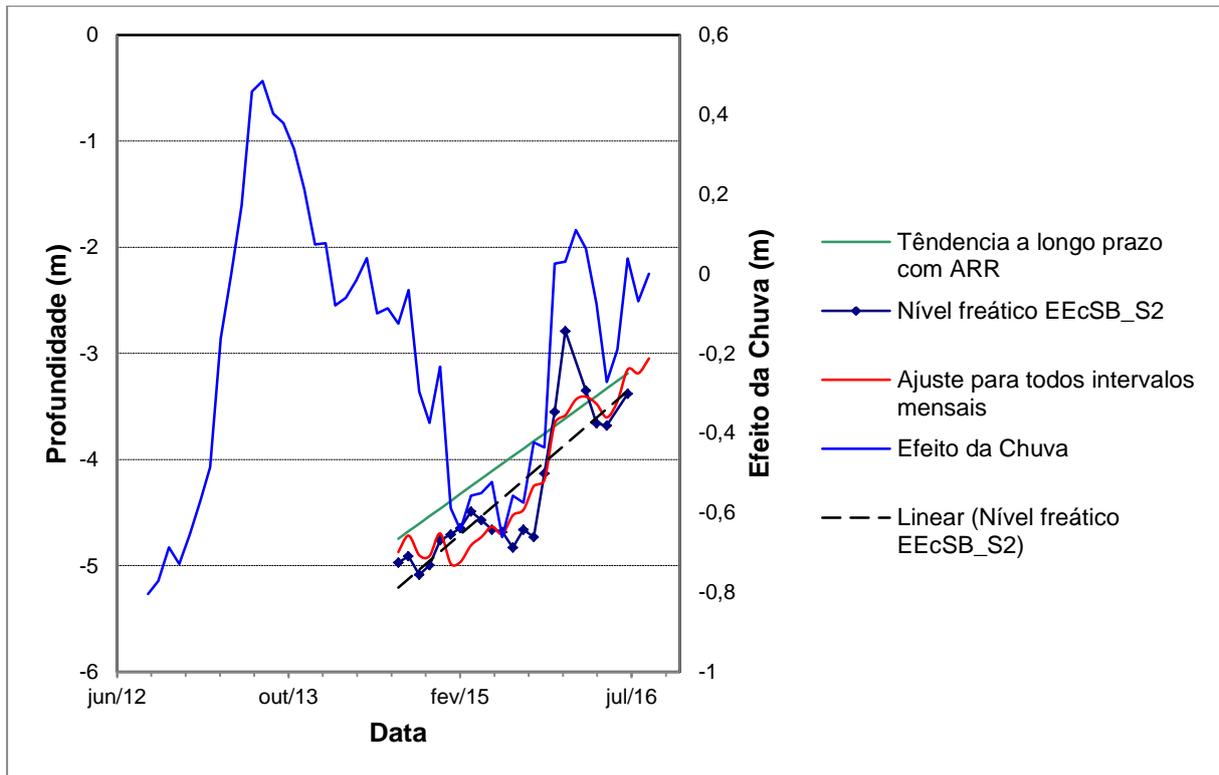


Figura 5. Ajuste do modelo HARTT à série de observações do nível freático entre 05 de setembro de 2014 e 02 de setembro de 2016 no poço S2.

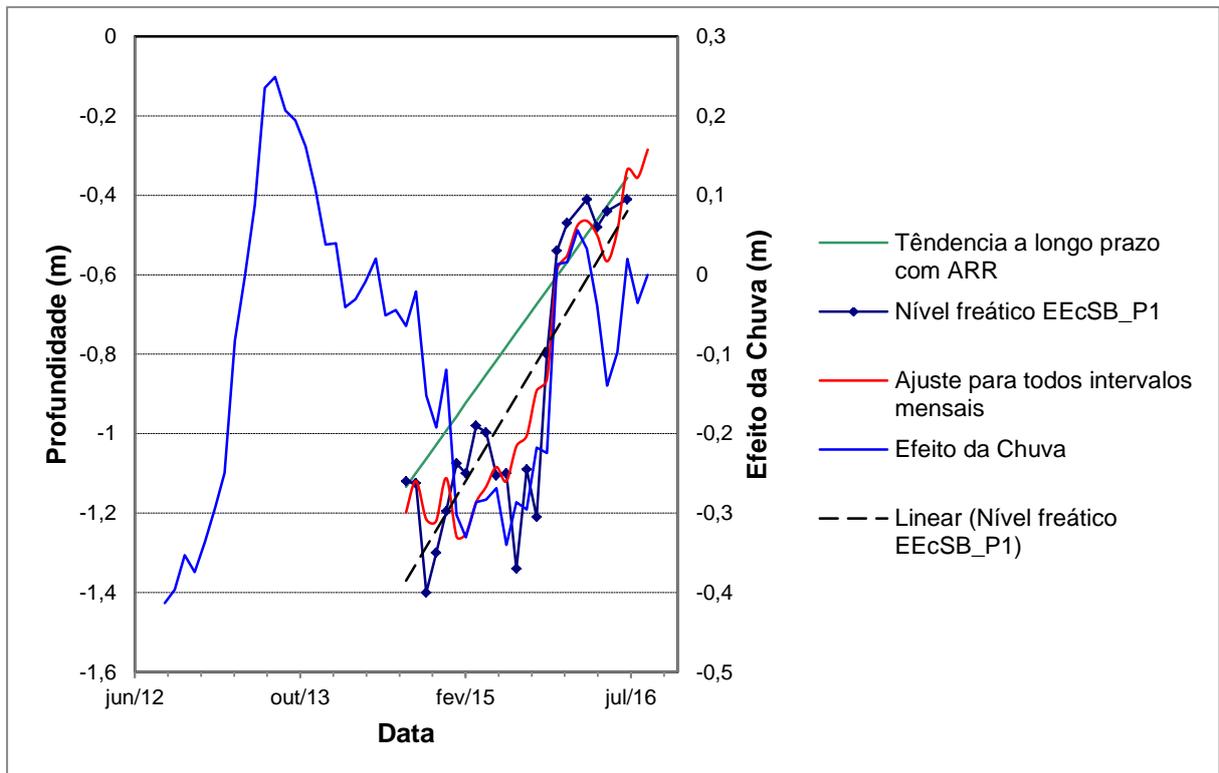


Figura 6. Ajuste do modelo HARTT à série de observações do nível freático entre 05 de setembro de 2014 e 02 de setembro de 2016 no poço P1.

A partir do modelo HARTT também calculou-se a taxa de elevação do poço por ano de monitoramento. Para a Bacia do Guarantã a elevação média do

lençol freático foi de 0,80 m/ano, totalizando 1,61 metros de recuperação no período de set/2014 a ago/2016. Na Bacia do Bugre a elevação foi de 0,36 m/ano,

sendo 0, 72 metros no período de monitoramento. Na Bacia do Santana a elevação média do lençol freático foi de 0,65 m/ano, totalizando 1,29 metros entre set/2014 e ago/2016, enquanto que a Bacia do Passarinho foi a que mais apresentou elevação dos níveis freáticos, com uma média de 0,77 m/ano e consequente elevação de 1,55 metros entre set/2014 e ago/2016.

SILVA & MANZIONE (2016) verificaram o potencial de utilização do modelo HARTT em áreas de Cerrado a partir de séries de monitoramento de níveis disponíveis para a EECSB no período entre dezembro de 2011 e março de 2015 e a mesma série de precipitação observada na EECSB mensalmente desde 1987. Nesse estudo, as séries observadas pelo IF estavam monitorando a resposta dos níveis em parcelas com e sem a presença de Pinus e em ambas as situações o modelo denotou uma memória curta, sem clara influência

CONCLUSÕES

As principais conclusões reunidas a partir do monitoramento agrohidrometeorológico realizado entre setembro de 2014 e agosto de 2016 foram:

- O modelo autoregressivo HARTT foi eficiente ao procurar explicar a defasagem entre eventos de precipitação e oscilações dos níveis freáticos,

AGRADECIMENTOS

À FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) pelo auxílio financeiro para realização dessa pesquisa (Processo # 2014/04524-7).

Ao Campus de Ourinhos da UNESP pelo apoio logístico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALI, R.; EMELYANOVA, I.; DAWES, W.; HODGSON, G.; MCFARLANE, D.J.; VARMA, S.; TURNER, J. **Groundwater methods used in the South-west western Australia sustainable Yields Project.** A

report to the Australian Government from the CSIRO South-west Western Australia Sustainable Yields Project. CSIRO Water for Healthy Country National Research Flagship, 2010. 116 p.

da vegetação. O modelo apresentou similaridades com os dados de entrada, com calibrações alcançando valores de R^2 superiores a 80%. O tempo de resposta de todos os poços analisados em relação a precipitação foi de um mês, ou seja, houve um evento de precipitação, e os níveis dos poços aumentaram após essa defasagem temporal.

As análises realizadas utilizando o modelo HARTT puderam através de técnicas como a regressão linear da hidrógrafa determinar a influência climatológica oriunda da precipitação na oscilação dos níveis freáticos. Entretanto, alguns ajustes denotaram a necessidade de análises mais aprofundadas sobre quais as principais forças atuantes na oscilação dos níveis freáticos na EECSB. Para casos como esse, SHAPOORI *et al.* (2015) recomendam modelos mais sofisticados como modelos de função de transferência de ruído.

- Os atrasos calculados entre os eventos de precipitação e oscilações nos níveis freáticos foram em geral de 1 a 2 meses, com alguns casos apresentando respostas instantâneas; e
- O modelo HARTT revelou um padrão de elevação dos níveis no período de monitoramento em todas as microbacias estudadas na EECSB.

Aos alunos do LabH₂O (Laboratório de Hidrologia e Hidrogeologia Operacional) do Campus de Ourinhos da UNESP e aos funcionários do Instituto Florestal do Estado de São Paulo pelo auxílio nos trabalhos de campo.

- BONGIOVANNI, S. **Caracterização geológica do município de Assis: a importância do estudo das coberturas cenozóicas**. 2008. 218 p. Tese (Doutorado em Geologia Regional) Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2008.
- CEPAGRI (Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura). **Clima dos Municípios Paulistas**. Disponível em: <<http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima-dos-municipios-paulistas.html>>. Acesso em: 16 mar. 2016.
- CPRM (Serviço Geológico do Brasil). **Domínio Geológico Litoestratográfico do Estado de São Paulo**. São Paulo, 2006. Escala 1:750.000
- CPTI (Cooperativa de Serviços, Pesquisas Tecnológicas e Industriais). **Diagnóstico da situação dos Recursos Hídricos da UGRH 17 – Médio – Paranapanema: Relatório Zero**. São Paulo, 1999. 1 CD-ROM.
- DAEE (Departamento de Águas e Energia Elétrica); IG (Instituto Geológico); IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas); CPRM (Serviço Geológico do Brasil). **Mapa de águas subterrâneas do Estado de São Paulo escala: 1:1.000.000**: nota explicativa. São Paulo: Conselho Estadual de Recursos Hídricos, 2005.
- EMBRAPA (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA). **Manual de métodos de análises de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 1997. 212 p.
- EMBRAPA (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA). **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 2006. 306 p.
- FERDOWSIAN, R.; MAJIDI, R.; MCCARRON, C. HARTT: User-friendly software for hydrograph analysis to separate rainfall and time trend. In: **27th Hydrology and Water Resources Symposium Proceedings**, Melbourne, 2002. CD-Rom.
- FERDOWSIAN, R.; PANNELL, D. J. Explaining trends in groundwater depths: distinguishing between atypical rainfall events, time trends, and the impacts of treatments. In: **MODSIM 2001 Congress Proceedings**, Canberra, 2001. p. 549-554 (Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand INC).
- FERDOWSIAN, R.; PANNELL, D. J.; MCCARRON, C.; RYDER, A.; CROSSING, L. Explaining Groundwater Hydrographs: Separating Atypical Rainfall Events from Time Trends. **Australian Journal of Soil Research**, v. 39, p. 861-875, 2001.
- HOFFMANN, W. A.; JACKSON, R. B. Vegetation-climate feedbacks in the conversion of tropical savanna to grassland. **Journal of Climate**, v. 13, p. 1593-1602, 2000.
- HONDA, E. A.; NIZOLI, E. C. **Caracterização das águas da Estação Ecológica de Águas De Santa Bárbara**. Relatório Técnico. São Paulo: Instituto Florestal, 2005. 41 p.
- IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo). **Mapa geológico do Estado de São Paulo**. São Paulo, 1981. Escala 1:500,000.
- IRITANI, M. A.; EZAKI, S. **As águas subterrâneas do Estado de São Paulo**. São Paulo: Secretaria do Estado do Meio Ambiente (SMA), 2008. 104 p.
- MANOEL FILHO, J. Água subterrânea: História e importância. In: FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E. C.; DEMETRIO, J. G. (Eds.) **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. Rio de Janeiro: CPRM/LABHID, 2008. p. 3-12.
- MANZIONE, R. L. **Águas Subterrâneas: Conceitos e Aplicações sob uma visão Multidisciplinar**; Jundiaí, Paco Editorial, 2015. 386 p.

- MEAULO, F. **Vulnerabilidade natural à poluição dos recursos hídricos subterrâneos da área de Araraquara (SP)**. 2004. 108 p. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2004.
- MELO, A. C. G.; DURIGAN, G. **Plano de manejo da Estação Ecológica de Santa Bárbara**. São Paulo: Instituto Florestal, 2011. 222 p.
- MESTRINHO, S. S. P. Monitoramento em água subterrânea. In: FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E. C.; DEMETRIO, J. G. A. **Hidrogeologia: Conceitos e aplicações**. CPRM/LABHID, Rio de Janeiro, 2008. p. 673-686.
- MOORE, J. E. **Field Hydrogeology – A guide for site investigations and report preparation**. London/New York/Boca Raton: CRC Press, 2012. 190 p.
- OLIVEIRA, J. B.; CAMARGO, M. N.; ROSSI, M.; CALDERANO FILHO, B. **Mapa Pedológico do Estado de São Paulo**. 1:500,000. Campinas: IAC/FAPESP, 1999.
- ORGANIZATION OF AMERICAN STATES / GLOBAL ENVIRONMENT FACILITY (OAS/GEF). **Proyecto para la Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible Integrado del SAG**. Montevideo, 2001. 133 p.
- ROSS, J. L. S.; MOROZ, I. C. **Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo**. Revista do Departamento de Geografia, v. 10, p. 41-56, 1996.
- SANTAROSA, L. V. **Mapeamento de níveis freáticos do Sistema Aquífero Bauru (SAB) em área de proteção ambiental em Águas de Santa Bárbara/SP durante o ano hidrológico 2014/15**. 124 p. 2016. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Irrigação e Drenagem) – Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2016.
- SHAPOORI, V.; PETERSON, T. J.; WESTERN, A. W.; COSTELLOE, J. F. Decomposing groundwater head variations into meteorological and pumping components: a synthetic study. **Hydrogeology Journal**, v. 23, p. 1431-1448, 2015.
- SILVA, F. de P. E. **Geologia de subsuperfície e hidrostratigrafia do grupo Bauru no Estado de São Paulo**. 166 p. 2003. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2003.
- SILVA, F. de P. E.; HUNG KIANG, C.; CAETANO-CHANG, M. R. Hidrostratigrafia do Grupo Bauru (K) no Estado de São Paulo. **Águas Subterrâneas**, v. 19, p. 19-36, 2005.
- SILVA, R. C. F. da; 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.
- SUGUIO, K. **Rochas sedimentares: propriedades, gênese e importância econômica**. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1980. 500 p.
- YIHDEGO, Y.; WEBB, J. A. Modeling of bore hydrographs to determine the impact of climate and land-use change in a temperate subhumid region of southeastern Australia. **Hydrogeology Journal**, v. 19, p. 877-887, 2011.