



APLICAÇÃO DO MODELO HARTT NO ESTUDO DAS OSCILAÇÕES DOS NÍVEIS FREÁTICOS DO SISTEMA AQUÍFERO BAURU (SAB) SOB VEGETAÇÃO DE CERRADO

HARTT MODEL APPLICATION IN THE STUDY OF BAURU AQUIFER SYSTEM (BAS) WATER TABLE DEPTHS OSCILATIONS UNDER CERRADO VEGETATION

Rita de Cássia Ferreira da Silva¹; Rodrigo Lilla Manzione²

Artigo recebido em: 03/01/2016 e aceito para publicação em: 25/08/2016.

DOI: <http://dx.doi.org/10.14295/ras.v30i3.28586>

Resumo – O monitoramento da relação entre a oferta e demanda de água em regiões vulneráveis e de interesse estratégico, como o Sistema Aquífero Bauru (SAB), é necessário para que sejam equilibrados os interesses ecológicos e econômicos das atividades desenvolvidas nessas áreas. O objetivo desse trabalho é explicar a partir do modelo autorregressivo HARTT (Hydrograph Analysis: Rainfall and Time Trend) as oscilações dos níveis freáticos do Sistema Aquífero Bauru na Estação Ecológica de Santa Bárbara, onde há vegetação nativa (Cerrado) e eventualmente invasões de *Pinus*, a fim de entender como os níveis freáticos respondem aos diferentes estímulos dos eventos de precipitação e o manejo da vegetação. No modelo HARTT são utilizados como dados de entrada séries de precipitação e de níveis freáticos monitorados em cinco piezômetros. 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. Esses resultados são necessários para gerar o conhecimento técnico para a gestão desse recurso. O uso do modelo de séries temporais permitiu detectar alterações no ciclo hidrológico e qual foi o padrão dessas alterações, decorrentes principalmente da precipitação.

Palavras-Chave: Águas subterrâneas. Cerrado. HARTT. Modelagem estatística.

Abstract – Monitoring the relationship between water supply and demand in vulnerable and strategic areas, such as the Bauru Aquifer System (BAS), is necessary for balance economic and ecological interests of activities developed in these areas. The aim of this study is to explain, from HARTT (Hydrograph Analysis: Rainfall and Time Trend) autoregression model, the behaviour of water table oscillations of Bauru Aquifer System at native vegetation (Cerrado) areas in order to understand how groundwater levels respond to different stresses from precipitation events and vegetation management. Time series of precipitation and water table depths monitored at five piezometers are used as data inputs at HARTT model. The model results presented similarities with the original data ranging calibrations with R^2 superior to 80%. The delay from a precipitation event to a groundwater response was one month for all wells. In other words, it means that after a precipitation event, the groundwater levels rise after this temporal delay. These results are need in order to generate the technical knowledge necessary for the management of this resource. The use of time series models allowed to detect changes in the hydrological cycle and patterns associated mostly with precipitation.

Keywords: Groundwater. Cerrado. HARTT. Statistical modelling

1 INTRODUÇÃO

O Sistema Aquífero Bauru (SAB) possui extensão regional ocupando aproximadamente 100.000 km² no estado de São Paulo (MANCUSO e CAMPOS, 2005). O SAB é um dos mais importantes aquíferos no estado,

quando se considera o enorme aproveitamento de suas águas subterrâneas (IRITANI e EZAKI, 2012). Na região hidrográfica do Médio Paranapanema (UGRHI-17), o Aquífero Bauru é um importante manancial hídrico subterrâneo, sendo responsável pelo abastecimento de rios e córregos da região, além do

1 Universidade Estadual Paulista (UNESP) - Faculdade de Ciências Agrônomicas E-mail: rita.cfs2@gmail.com

2 Universidade Estadual Paulista (UNESP) - Faculdade de Ciências Agrônomicas E-mail: rlmanzione@gmail.com

abastecimento de água em pequenas propriedades e núcleos urbanos rurais (COOPERATIVA DE SERVIÇOS E PESQUISAS TECNOLÓGICAS - CPTI, 1999).

A Estação Ecológica de Santa Bárbara (EEcSB) encontra-se inserida nesse contexto, no município de Águas de Santa Barbara (SP). Essa área tem importância estratégica, pois além de proteger uma amostra do bioma Cerrado, preserva importantes nascentes abastecidas pelo SAB que formam importantes rios da UGRHI-17. A relação entre níveis freáticos e a vazão dessas nascentes condicionam as atividades agrícolas irrigadas, geração de energia, abastecimento urbano, diluição de esgotos, entre outros usos da água do Rio Pardo, um dos principais mananciais da região.

Informações sobre a dinâmica do lençol freático são importantes para balancear os interesses econômicos e ecológicos quanto ao uso do solo e da água (VON ASMUTH e KNOTTERS, 2004). Técnicas de modelagem de dados podem ajudar a compreender esta dinâmica. A qualidade de um modelo é avaliada pela capacidade em representar melhor a variabilidade de determinado sistema, sujeito as variáveis da entrada, como a precipitação, por exemplo, que varia tanto no tempo como no espaço. A grande variação espacial das características naturais e do uso do solo resulta numa grande quantidade de informações a serem transferidas para os modelos, principalmente para os modelos distribuídos, onde são estabelecidas relações entre características físicas e os parâmetros dos modelos (TUCCI, 1998). A análise de séries temporais é uma maneira elegante de modelar a variação de dados ao longo do tempo sem a complexidade de modelos físico-mecanísticos. Em locais onde a disponibilidade de dados é limitada, a modelagem estocástica apresenta-se como uma alternativa interessante de análise uma vez que possibilita a estimativa das incertezas associadas as previsões. Segundo Von Asmuth e Knotters (2004), modelos estatísticos baseados em séries temporais poder trazer resultados tão acurados (ou não) quanto modelos determinísticos sofisticados, cabendo ao analista interpretar os erros e inferir da melhor forma

sobre o sistema em análise com os resultados gerados (MANZIONE, 2014).

Uma linha comum em estudos ambientais, é a necessidade metodológica de ferramentas capazes de descrever e prever estes processos complexos e, tipicamente, de alta-dimensionalidade. Cressie e Holan (2011) descrevem novas abordagens para a modelagem neste contexto. O estudo de séries temporais ambientais é fundamental para o objetivo maior de sustentabilidade e adaptação. Saber como e, em última análise, porque os processos ambientais mudam ao longo do tempo dá aos governos e protetores dos comuns um meio racional para tomada de decisão. Aplicações da análise de séries temporais podem ser utilizadas para preencher e completar séries irregulares de carga hidráulica a partir de dados de precipitação (YI e LEE, 2003), quantificar interações entre águas subterrâneas e águas superficiais (HATCH *et al.*, 2006), ou mesmo estendidas à avaliação de múltiplos estresses (escoamento de base, bombeamentos, vegetação, clima, barragens) no comportamento dos níveis das águas subterrâneas (VON ASMUTH *et al.*, 2008). Modelos mais complexos de séries temporais podem capturar comportamentos não lineares da drenagem do solo (PETERSON e WESTERN, 2014) ou mesmo seu tempo de resposta de recarga a partir da precipitação (HOCKING e KELLY, 2016).

Este trabalho analisou dados climáticos e de monitoramento de níveis freáticos do SAB em uma área da EEcSB para entender como é a relação entre a precipitação e as águas subterrâneas. Para isso, aplicou-se o modelo autoregressivo de séries temporais HARTT (Hydrograph Analysis: Rainfall And Time Trends), aos dados de cinco poços de monitoramento (piezômetros) sob vegetação nativa de Cerrado para detectar possíveis influências do manejo da vegetação no processo de oscilação dos níveis freáticos.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Caracterização da área de estudo

A área de estudo pertence a Estação

Ecológica de Santa Bárbara (EEcSB), localizada no município de Águas de Santa Bárbara/SP, nas coordenadas 22°48'59" S e 49°14'12" O. A Figura 1 ilustra o perímetro da Estação Ecológica de Santa Bárbara (EEcSB) e a bacia hidrográfica do Ribeirão do Bugre, onde estão localizados os piezômetros. A área total da EEcSB é de 2.712 ha. Segundo a classificação climática de Köppen, o clima da re-

gião é do tipo Cwa ou tropical sub-úmido (clima quente com inverno seco). 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 e DURIGAN, 2011).

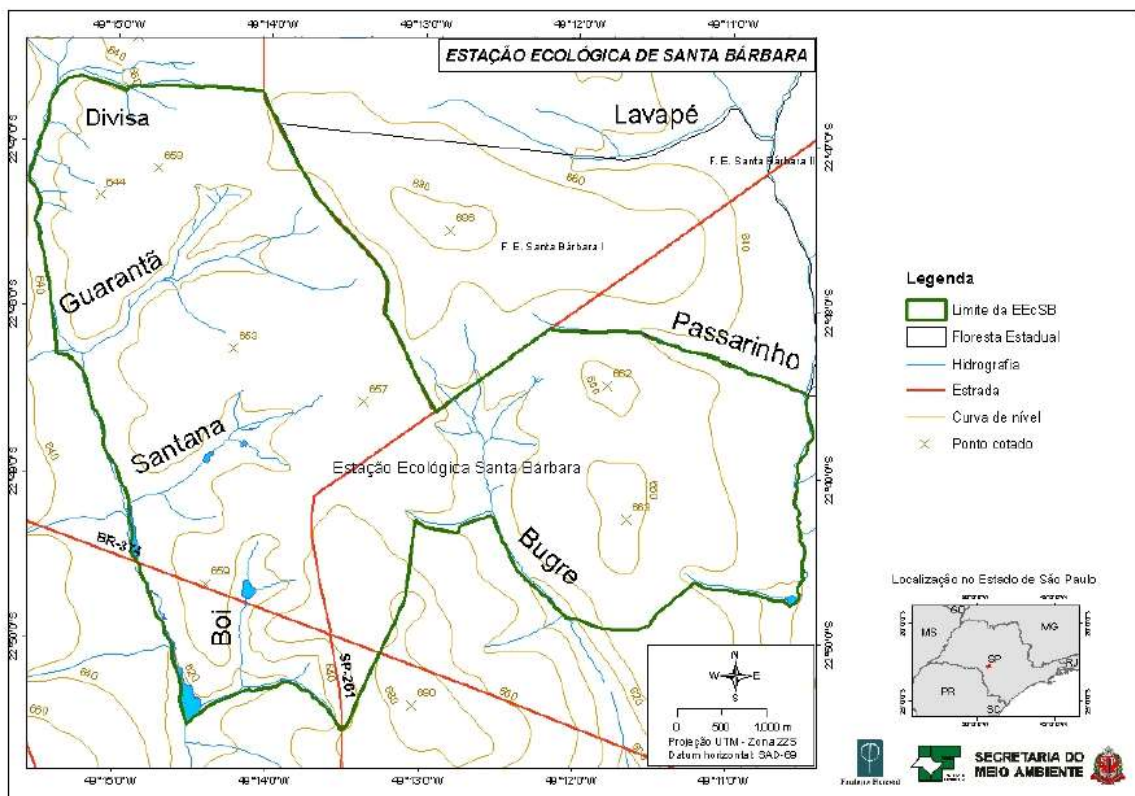


Figura 1- Delimitação da área da Estação Ecológica de Santa Bárbara (Fonte: Plano de Manejo da Estação Ecológica de Santa Bárbara (HONDA; NIZOLI, 2011))

Figure 1- Delimitation of Santa Barbara Ecological Station (Source: Plano de Manejo da Estação Ecológica de Santa Bárbara (HONDA; NIZOLI, 2011))

Na região em estudo, as unidades lito-estratigráficas 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 cenozóicos. 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. A Figura 2 mostra um detalhe da geologia da área de estudo. Os tipos de solos que prevalecem na EEcSB são o Latossolos vermelhos (LV56), que apresentam alta suscetibilidade a erosão, e são pouco filtrantes devido à sua textura arenosa, e Gleissolos próximo aos cursos d'água (MELO e DURIGAN, 2011).

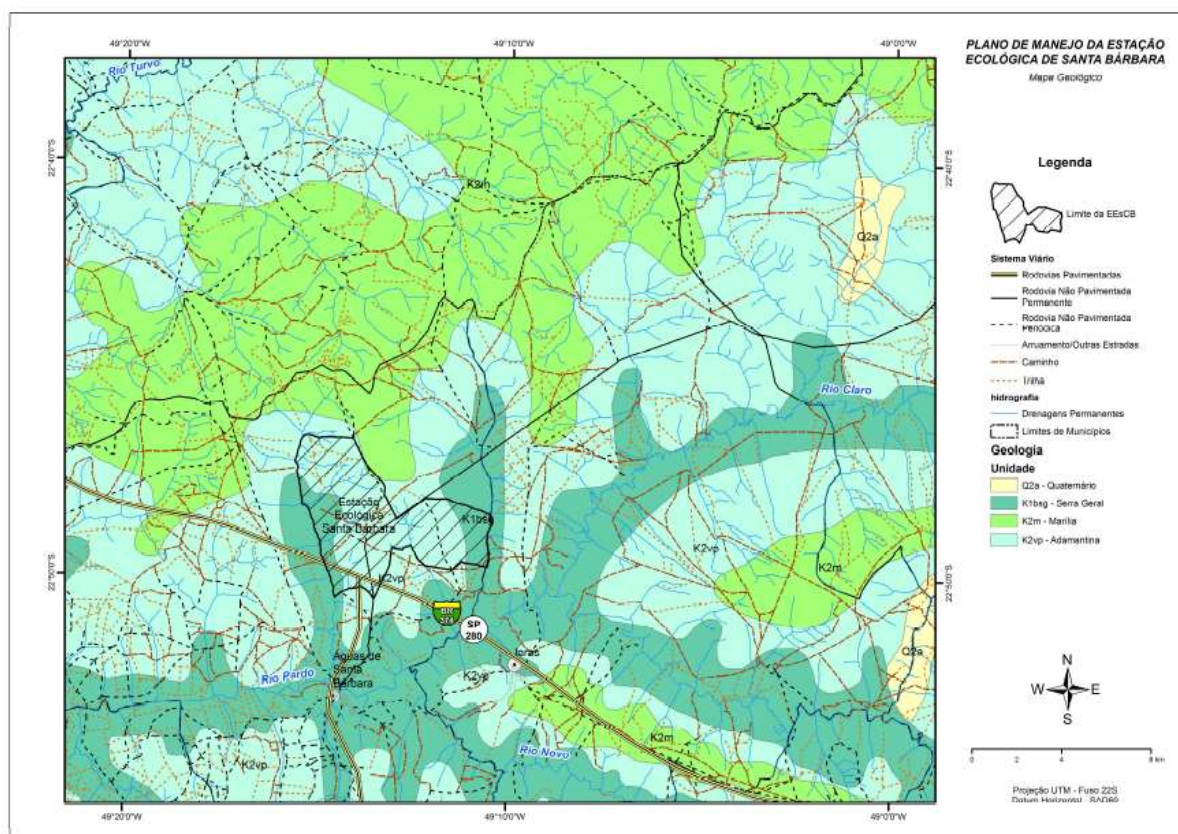


Figura 2 – Geologia da região da Estação Ecológica de Santa Bárbara (Fonte: MELO e DURIGAN, 2011)
Figure 2 – Geology of Santa Barbara Ecological Station region (Source: MELO e DURIGAN, 2011)

Em relação à flora, a região da EECSB era originalmente coberta por vegetação típica de Cerrado e Floresta Estacional Semidecidual nas regiões mais férteis e nos solos mais argilosos. A silvicultura provocou perturbações nas áreas de vegetação nativa, devido à invasão de indivíduos *Pinus spp*, que segundo o Plano de Manejo (MELO e DURIGAN, 2011), “tem provocado graves danos à vegetação nativa devido a invasão biológica”. Em alguns trechos a invasão é tão intensa, que é possível mapear essas áreas como uma categoria de vegetação a parte. Essas áreas exigem intervenções intensas para a erradicação da espécie invasora.

2.2 Série de dados e demais informações disponíveis

Os piezômetros para monitoramento freático foram instalados na bacia do Ribeirão do Bugre, cuja cabeceira encontra-se nos do-

mínios da EECSB. Para instalação dos piezômetros, foram utilizadas ponteiras para piezômetro comerciais, conectores de rosca, tubos de PVC de 3/4” de diâmetro e conexões tipo luva de PVC para serem conectadas a essas ponteiras e montadas a campo conforme a profundidade perfurada. Assim, adotou-se o critério de uma vez atingido o nível freático do local de perfuração, seriam perfurados mais 1-1,5 metros para instalação da ponteira. Para perfuração foi utilizado um equipamento tipo trado com capacidade de perfuração de até 7 metros. O trado perfurou o solo e o arenito com uma espessura de 6”. O valor perfurado era medido a campo e posteriormente os canos cortados em varas de 1,0 metro eram montados, colados às luvas e introduzidos no furo de forma que permanecessem em torno de 75 cm de tubo para fora da superfície para permitir a medição. O espaço entre o conjunto ponteira/cano foi preenchido nos primeiros metros com areia industrial autoclavada (utili-

zada em filtros para piscina), e depois cimentado com o material retirado da perfuração. Após a cimentação da base, foi introduzido um tubo de PVC branco de 6" de diâmetro com tampa tipo *cap* para proteger o piezômetro.

O monitoramento foi iniciado em janeiro de 2010 pelo Instituto Florestal e coletados com uma frequência quinzenal, até março de 2015. As séries climatológicas utilizadas foram coletadas com o uso de pluviômetros manuais a partir do ano de 1987 até 2015, como parte dos registros históricos. Todo manejo realizado na área, envolvendo corte de espécies invasoras, evento de fogo espontâneos e controlados, e aplicações de herbicidas foram todos documentados e disponibilizados para consulta (ABREU e DURIGAN, 2013).

A Tabela 1 apresenta a localização dos poços de monitoramento e o uso da terra na região onde estão instalados os piezômetros. A vegetação descrita na Tabela 1 é a vegetação predominante ao redor dos poços, uma vez que a invasão do *Pinus* ocupou grandes extensões de áreas originalmente ocupadas por Campos Cerrados. Os poços AB1 a AB5 foram instalados em janeiro de 2010 em uma área invadida por 3 ha de *Pinus*. O *Pinus* foi erradicado em fevereiro do mesmo ano, porém voltou a crescer em março de 2010. Através do manejo com fogo, em maio de 2013 a invasão de *Pinus* foi totalmente controlada com a erradicação total da espécie. A Figura 3 ilustra a localização do poço AB5 e a atual situação da vegetação local.

Tabela 1 – Localização dos poços de monitoramento e uso e ocupação da terra

Table 1 – Monitoring wells location and land use and cover

Poços	Localização		Profundidade (m)	Vegetação nativa
	Latitude Sul	Latitude Oeste		
AB1	22° 49' 10,2"	49° 13' 33,7"	7,0	Cerrado típico
AB2	22° 49' 09,7"	49° 13' 33,1"	4,5	Cerrado típico
AB3	22° 49' 09,8"	49° 13' 32,6"	5,0	Cerrado denso
AB4	22° 49' 09,6"	49° 13' 32,0"	4,0	Cerrado denso
AB5	22° 49' 09,3"	49° 13' 31,4"	5,0	Cerrado denso



Figura 3 - Visão geral da vegetação ao redor do poço AB5 onde houve invasão maciça de *Pinus* e posterior erradicação

Figure 3 – General vision of well AB5 surroundings where massive *Pinus* invasion occurred and later eradication

Um fator preponderante que pode ter maior influência nas oscilações dos níveis freáticos é o manejo constante da vegetação, esses esforços ocorrem seja para conter o avanço do Pinus, ou para provocar uma sucessão ecológica para que a vegetação nativa se reestabeleça sem a invasão dessas espécies exóticas, usadas outrora para o reflorestamento da EECsB.

2.3 Modelo HARTT (Hydrograph Analysis: Rainfall And Time Trends)

O modelo HARTT (Hydrograph Analysis: Rainfall And Time Trends) foi desenvolvido por Ferdowsian *et al.* (2001) para realizar análises em séries de oscilação do nível freático e correlacioná-las com eventos climáticos de precipitação. O modelo calcula o atraso (*lag*) entre o evento de precipitação e a resposta freática, determinando assim se existe uma influência adicional (não climática) nas oscilações das águas subterrâneas ao longo do tempo, a partir das entradas da chuva (YIHDEGO e 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 (Resíduo Acumulado de Precipitação Mensal):

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

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 RAPA (Resíduo Acumulado de Precipitação Anual) 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.

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

onde, \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 de ano.

O modelo de regressão usada no HARTT é formulado como:

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

onde, $Prof$ 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; de fatores que afetam os níveis de água subterrânea e na estimativa de recarga (YIHDEGO e WEBB, 2011). O modelo pode ainda ser utilizado para estimar o impacto das alterações climáticas ou intervenção humana, tais como a mudança de uso do solo, nos níveis de águas subterrâneas (FERDOWSIAN e PANNELL, 2001). No caso de estimativas a partir de chuvas anuais recomenda-se a utilização de séries maiores que 10 anos (FER-

DOWSIAN *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, obtêm-se uma série de dados de entrada que represente a oscilação climática sazonal na região. As séries temporais foram avaliadas através da análise de hidrogramas dos poços de monitoramento entre 2010 e 2015 e as séries de chuva mensal foram coletadas dos pluviômetros instalados na EECSB no período de 1987 a 2015. Esses hidrogramas exibem o cálculo com o melhor ajuste e um gráfico mostrando a curva ajustada e o efeito da precipitação juntamente com as leituras de níveis freáticos (FERDOWSIAN *et al.*, 2001).

tada e o efeito da precipitação juntamente com as leituras de níveis freáticos (FERDOWSIAN *et al.*, 2001).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Através dos hidrogramas gerados, os efeitos da precipitação sobre os níveis freáticos são estimados separadamente para cada poço, selecionando o valor que resulta no melhor ajuste para a regressão, os dados coletados desses hidrogramas, foram agrupados na Tabela 2 que apresenta os resultados do modelo que apresentaram o melhor ajuste estatístico dos hidrogramas.

Tabela 2 – Estatísticas dos ajustes do modelo HARTT
Table 2 – HARTT model adjustments statistics

Piezômetro	R^2 (%)	Intercepto	X1 (p -valor) Precipitação (mm)	X2 (p -valor) Tempo (meses)
AB1	84,35	-1,07234	0,0046 (0,00)	-0,0711 (0,00)
AB2	80,23	-1,69524	0,0032 (0,00)	-0,0469 (0,00)
AB3	84,15	-1,90742	0,0043 (0,00)	-0,0516 (0,00)
AB4	84,31	-1,90570	0,0043 (0,00)	-0,0514 (0,00)
AB5	82,22	-2,37730	0,0038 (0,00)	-0,0313 (0,00)

R^2 : coeficiente de determinação da reta de regressão, p -valor: nível significância.

Os piezômetros AB1, AB3 e AB4 foram os que melhor se ajustaram ao modelo com um mês de atraso, ou seja, mais que 84% das oscilações podem ser explicadas através calibração dos dados de nível freático às séries de precipitação pelo modelo HARTT. Os outros efeitos podem ser explicados através de outras variáveis não incluídas no estudo ou capturadas pelo modelo. O mesmo caso foi observado por Soldera e Manzione (2012) em área do SAB no município de Assis/SP, onde a variação de nível em poços próximos a um rio não podia ser completamente explicada pela precipitação e níveis freáticos. Os p -valores indicam que os parâmetros de precipitação e de tempo do modelo são significativos estatisticamente.

O atraso calculado (Tabela 3) não re-

presenta necessariamente a defasagem do primeiro ou do maior impacto da precipitação no lençol freático, mas a defasagem que produz a maior correlação estatística. Em muitos casos, o melhor ajuste de atraso é maior que o primeiro impacto detectado (FERDOWSIAN *et al.*, 2001). O atraso calculado pelo modelo para os poços foi de um mês para cada poço. Foram testados diferentes defasagens temporais para o ajuste do modelo HARTT e verificou-se que quanto maior o atraso menor o R^2 . Em outras palavras, os poços apresentam uma rápida resposta a pulsos de precipitação, uma vez que a zona não saturada não é espessa e os níveis relativamente superficiais nos pontos de monitoramento, sendo o modelo HARTT eficiente na caracterização do comportamento dos níveis freáticos.

Tabela 3 – Atraso e profundidade dos níveis dos poços calculados pelo modelo HARTT
Table 3 – Delay and levels depth calculated by HARTT model

Piezômetro	Atraso (meses)	Profundidade Inicial (m)	Profundidade Final (m)	Declínio (m/ano)
AB1	1	-2,67	-3,53	-0,79
AB2	1	-2,91	-3,18	-0,55
AB3	1	-3,26	-3,51	-0,56
AB4	1	-3,25	-3,51	-0,56
AB5	1	-3,87	-2,94	-0,31

Atraso: ordem do modelo autoregressivo ajustado

A partir da mensuração desses atrasos, pôde-se inferir sobre a memória do sistema hidrogeológico local, ou seja, qual o tempo entre um evento de precipitação e uma resposta do nível freático (MANZIONE *et al.*, 2010). Uma vez que existe um elevado número de nascentes na região, os poços não são muito profundos e consequentemente os níveis são superficiais, espera-se uma rápida

resposta da oscilação após eventos de precipitação.

As Figuras 4 a 8 mostram o ajuste realizado para os dados de oscilação do nível freático e precipitação do SAB para todos os poços no período de março de 2010 a março de 2015.

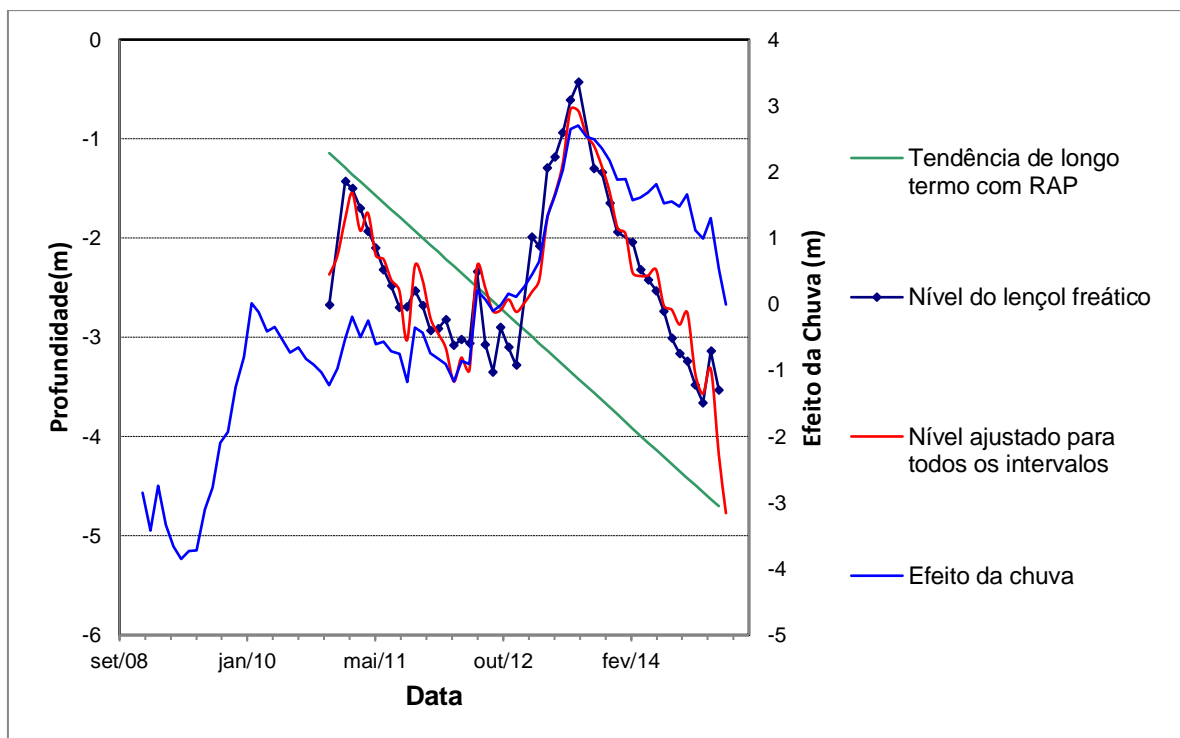


Figura 4 - Ajuste do modelo para os dados de oscilação do nível freático e para o poço AB1 no período de dezembro de 2010 a março de 2015

Figure 4 – Model adjustment for water table depths and precipitation at well AB1 from Dec 2010 to Mar 2015

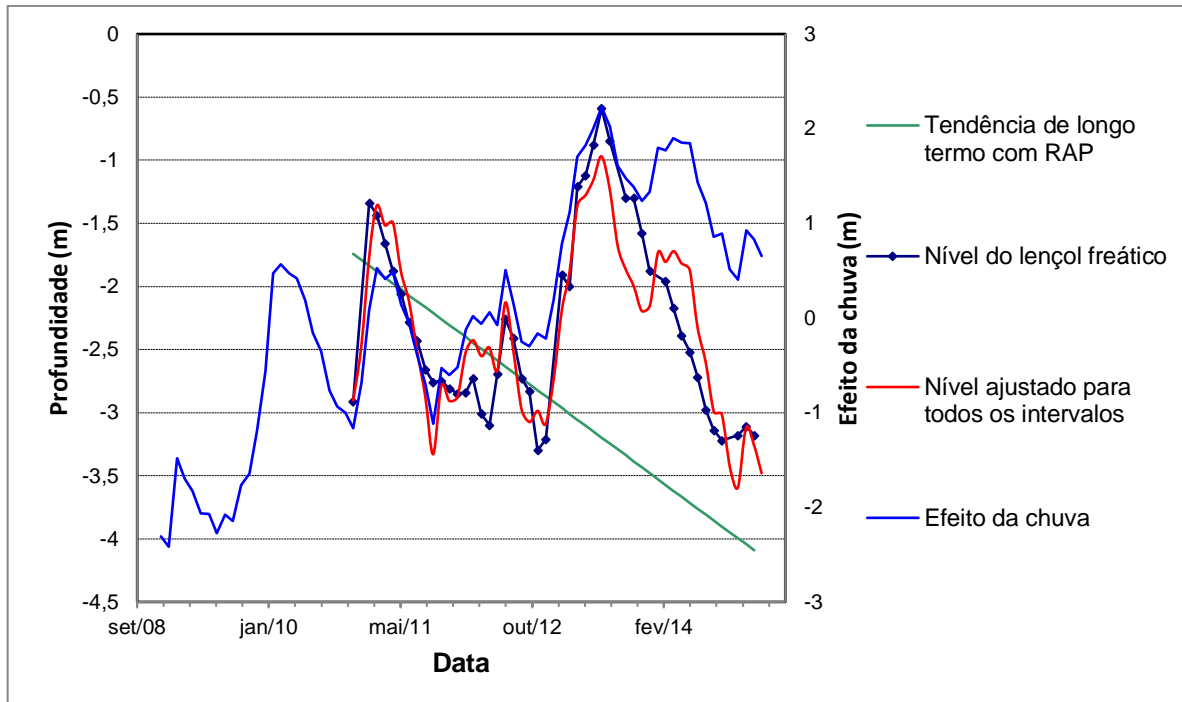


Figura 5 - Ajuste do modelo para os dados de oscilação do nível freático e para o poço AB2 no período de dezembro de 2010 a março de 2015

Figure 5 – Model adjustment for water table depths and precipitation at well AB2 from Dec 2010 to Mar 2015

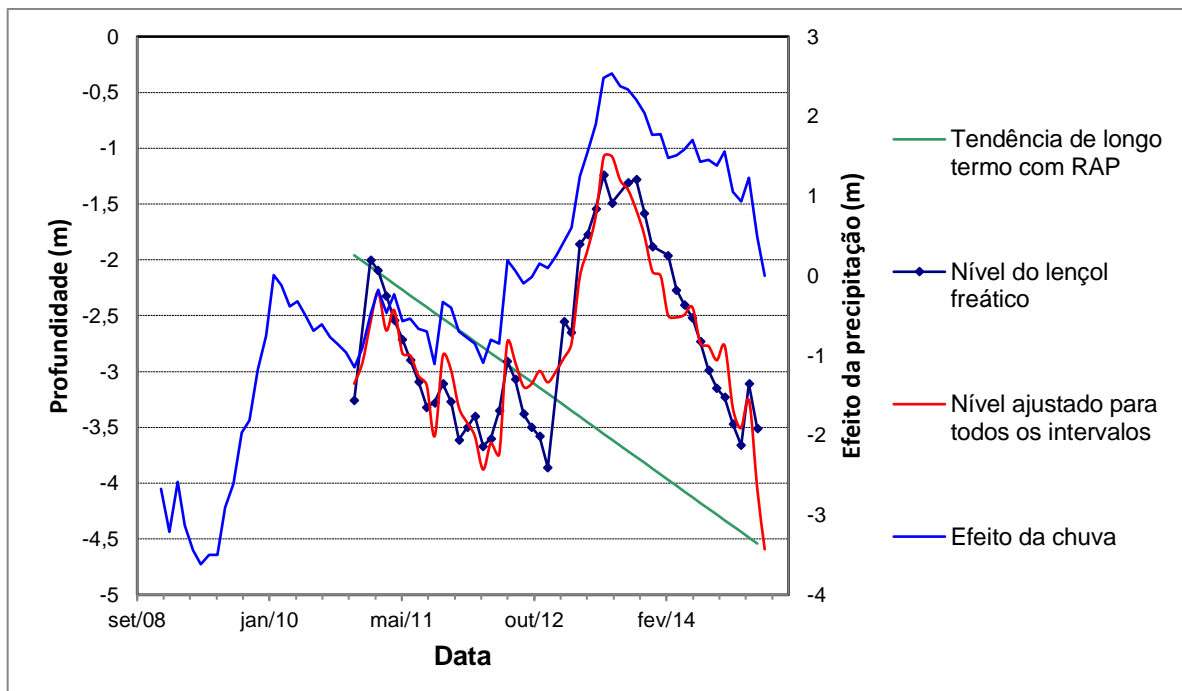


Figura 6 - Ajuste do modelo para os dados de oscilação do nível freático e para o poço AB3 no período de dezembro de 2010 a março de 2015

Figure 6 – Model adjustment for water table depths and precipitation at well AB3 from Dec 2010 to Mar 2015

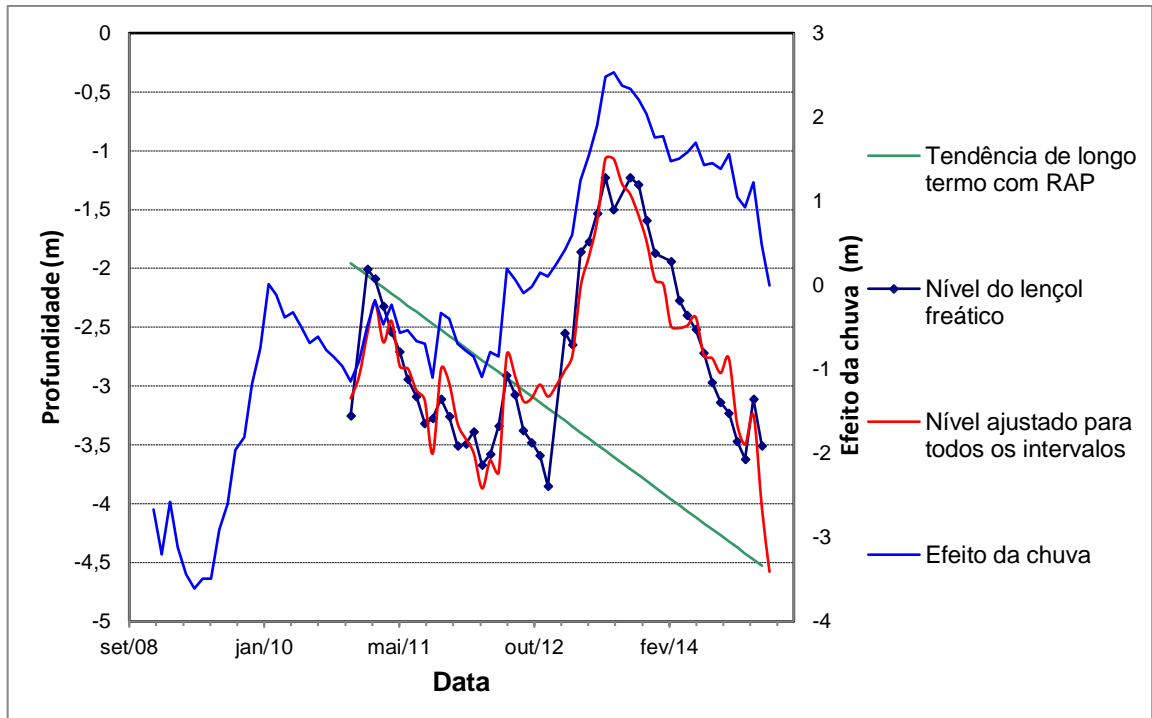


Figura 7 - Ajuste do modelo para os dados de oscilação do nível freático e para o poço AB4 no período de dezembro de 2010 a março de 2015

Figure 7 – Model adjustment for water table depths and precipitation at well AB4 from Dec 2010 to Mar 2015

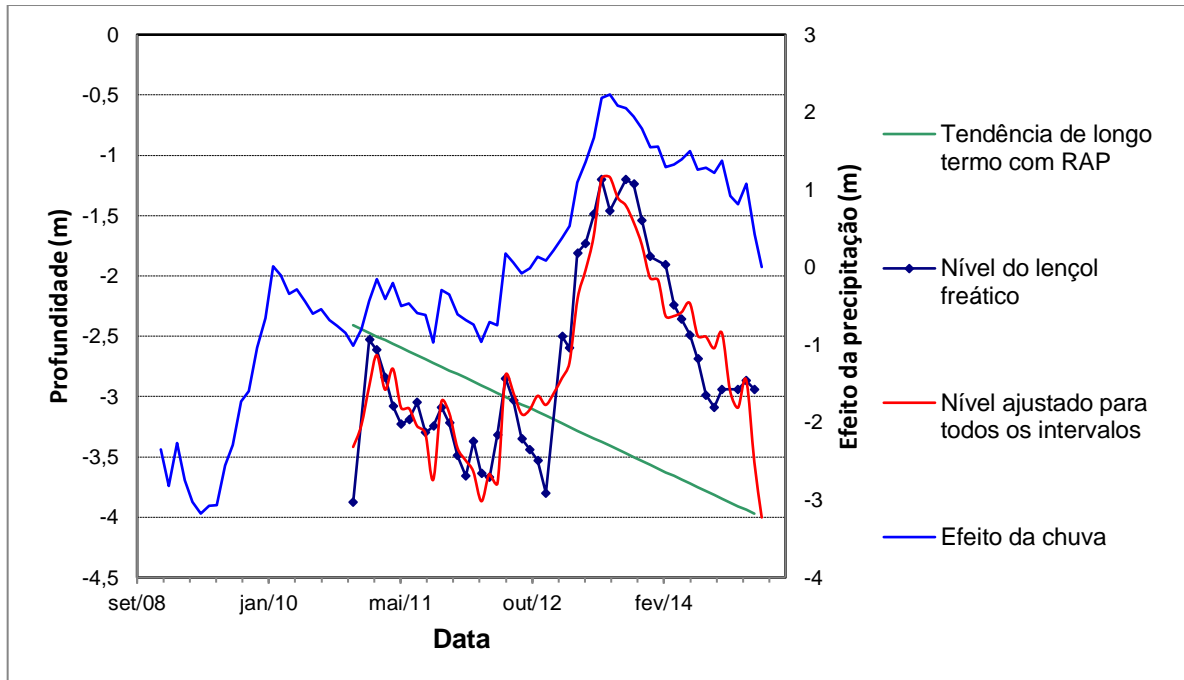


Figura 8 - Ajuste do modelo para os dados de oscilação do nível freático e para o poço AB5 no período de dezembro de 2010 a março de 2015

Figure 8 – Model adjustment for water table depths and precipitation at well AB5 from Dec 2010 to Mar 2015

Os piezômetros localizados na bacia do Ribeirão do Bugre estão em uma área onde até 2010 haviam 3 ha de invasão de Pinus ao redor dos poços, espécie que posteriormente foi erradicada da área, porém as árvores mais resistentes voltaram a crescer, e foram totalmente erradicadas em maio de 2013. Esses poços apresentaram oscilações mais frequentes nos níveis, que podem ter ocorrido devido à rápida resposta do solo arenoso em um evento de chuva.

Esses piezômetros acompanharam as variações na precipitação ao longo do tempo, decaindo em períodos de seca e aumentando nos meses mais chuvosos. Com a ausência do Pinus, a precipitação passou a não ser interceptada pela copa das árvores e por seu sistema radicular, possibilitando que a precipitação infiltrasse diretamente no aquífero provocando uma resposta imediata no aumento dos níveis freáticos.

De forma geral, o que se observou nos cinco piezômetros é que mesmo com as práticas de manejo empregadas e com a erradicação de extensas áreas de vegetação invasora, o que determina a oscilação é o regime pluviométrico. Tanto os resultados estatísticos quanto os atrasos e as inspeções visuais nos hidrogramas confirmam que os padrões observados nos poços seguem os registrados nos pluviômetros. Ou seja, os níveis na área de estudo são fortemente influenciados pela sazonalidade. O manejo da vegetação na EECSB exerce uma influência secundária no processo de oscilação dos níveis freáticos em área florestal.

A tendência de longo termo na área é de queda nos níveis freáticos, conforme observado nos gráficos. Durante os 5 anos de monitoramento, foi calculado uma taxa de declínio anual entre 0,79 m no poço AB1 a montante e 0,31 no poço AB5 a jusante da toposequência onde os poços estão localizados. No total, o poço AB1 apresentou uma queda nos níveis de 3,75 m no período entre março de 2010 e

março de 2015, mesmo com alguns momentos de recarga principalmente no verão 2012-2013. No poço AB5 o declínio no período foi de 1,55 m, também apresentando momentos de recarga. O comportamento dos poços AB2, AB3 e AB4 foi similar, com valores intermediários entre os dois exemplos apresentados.

Esse declínio nos níveis acompanhou a queda no regime pluviométrico na EECSB, uma vez que entre os anos de 2014 e 2015 houve um período de seca no Estado de São Paulo (COELHO *et al.*, 2015). Como se pode observar, todos os piezômetros do Ribeirão Água do Bugre sofreram queda nos níveis nesse período. Recomenda-se estender esse tipo de estudo a outros compartimentos do SAB e um contínuo e sistemático monitoramento dos níveis freáticos para que esse tipo de informação possa estar contida nos planos de bacia onde os recursos hídricos subterrâneos são mananciais importantes e estratégicos.

4 CONCLUSÕES

- O modelo HARTT apresentou um bom ajuste aos dados observados de precipitação e níveis freáticos, com ajustes variando entre 79 e 85%;
- Os níveis apresentaram um atraso de um mês em relação a eventos de precipitação que ocasionassem alguma mudança no volume de água armazenado;
- Foi verificada uma tendência de queda nos níveis a longo prazo, possivelmente influenciado por eventos climatológicos recentes;
- A precipitação exerce maior influência na oscilação dos níveis freáticos na EECSB, uma vez que o manejo da vegetação não mostrou grandes alterações no ciclo hidrológico na região.

REFERÊNCIAS

- ABREU, R. C. R.; DURIGAN, G. Erradicação da invasão por árvores de *Pinus* no Cerrado. In: DURIGAN, G; RAMOS, V. S. (Orgs) **Manejo Adaptativo: primeiras experiências na Restauração de Ecossistemas**. São Paulo: Páginas & Letras, 2013; p. 43-46.
- 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. 116 pp. 2010.
- 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.
- COELHO, C. A. S.; CARDOSO, D. H. F.; FIRPO, M. A. F. **Precipitation diagnostics of an exceptionally dry event in São Paulo, Brazil**. Theoretical and Applied Climatology, 2015. doi: 10.1007/s00704-015-1540-9
- CRESSIE, N.; HOLAN, S. H. Editorial: Special issue on time series in the environmental sciences. **Journal of Time Series Analysis**, v. 32, p.337–338, 2011. doi: 10.1111/j.1467-9892.2011.00739.x
- CPTI (Cooperativa de Serviços, Pesquisas Tecnológicas e Industriais). **Diagnóstico da situação dos Recursos Hídricos da UGRHI-17 – Médio – Paranapanema: Relatório Zero**. São Paulo, Cooperativa de Serviços, Pesquisas Tecnológicas e Industriais, 1999. 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, 10-13 December 2001. pp. 549-554 (Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand INC).
- 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.
- HATCH, C. E.; FISHER, A. T.; REVENAUGH, J. S.; CONSTANTZ, J.; RUEHL, C. Quantifying surface water-groundwater interactions using time series analysis of streambed thermal records: Method development. **Water Resources Research**, v. 42, W10410, 2016. doi: 10.1029/2005WR004787
- HOCKING, M.; KELLY, B. F. J. Groundwater recharge and time lag measurement through Vertosols using impulse response functions. **Journal of Hydrology**, v.535, p. 22–35, 2016. doi: 10.1016/j.jhydrol.2016.01.042
- 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.
- IRITANI, M. A.; EZAKI, S. **As águas subterrâneas do Estado de São Paulo**. São Paulo: Secretaria do Estado do Meio Ambiente, 3. ed., 2012. 103p.
- MANCUSO, M. A.; CAMPOS, J. E. Aquífero Bauru. In: ROCHA, G. (coord). **Mapa de águas subterrâneas do Estado de São Paulo: escala 1:1.000.000: nota explicativa**. São Paulo: DAEE – Departamento de Águas e Energia Elétrica; IG – Instituto Geológico; IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo; CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 2005. p. 32-38.
- MANZIONE, R. L. Incorporação de incertezas associadas à predição de modelos hidrológicos aos instrumentos de gestão dos recursos hídricos. **Caderno Prudentino de Geografia**. n. 36, p. 215 – 227, 2014.
- MANZIONE, R. L.; MARCUSSO, F. F. N.; WENDLAND, E. Modelagem de níveis freáticos em área de recarga do Sistema Aquífero Guarani sob diferentes usos do solo. In: XVI Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas e XVII Encontro

- Nacional de Perfuradores de Poços, 2010, São Luís. **Anais XVI Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas e XVII Encontro Nacional de Perfuradores de Poços**. São Paulo, ABAS: 2010. CD-ROM.
- MELO, A. C. G. DURIGAN, G. (Org.). **Estação Ecológica de Santa Bárbara: Plano de Manejo**. São Paulo: Secretaria do Meio Ambiente, 2011. 222 p. Disponível em: <http://iflorestal.sp.gov.br/files/2013/03/Plano_de_Manejo_EEc_Santa_Barbara.pdf>. Acesso em: 28 abr. 2014.
- PETERSON, T. J.; WESTERN, A. W. Nonlinear time-series modeling of unconfined groundwater head. **Water Resources Research**, v. 50, p. 8830 – 8355, 2014. doi: 10.1002/2013WR014800
- SOLDERA, B. C.; MANZIONE, R. L. Modelagem de níveis freáticos no Sistema Aquífero Bauru como ferramenta na gestão de recursos hídricos subterrâneos. **Revista Ciência Geográfica**, v. 16, p. 54-61, 2012.
- TUCCI, C.E.M. **Modelos hidrológicos**. Porto Alegre, 2. ed. Universidade UFRGS, 1998, 680p.
- VON ASMUTH, J. R.; KNOTTERS, M. Characterising groundwater dynamics based on a system identification approach. **Journal of Hydrology**, v. 296, p. 118-34, 2004.
- VON ASMUTH, J. R.; MAAS, K.; PETERSEN, J. Modeling time series of ground water head fluctuations subjected to multiple stresses. **Ground water**. v. 46, p. 30-40, 2008.
- YI, M.; LEE, K. Transfer function-noise modeling of irregularly observed groundwater heads using precipitation data. **Journal of Hydrology**, v. 288, p. 272-287, 2003.
- 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.