
MODELAGEM DE NÍVEIS FREÁTICOS NO SISTEMA AQUIFERO BAURU COMO FERRAMENTA NA GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS

MODELLING WATER TABLE DEPTHS IN THE BAURU AQUIFER SYSTEM AS A TOOL FOR GROUNDWATER MANAGEMENT

Bruna Camargo Soldera¹
Rodrigo Lilla Manzione²

RESUMO: O atual quadro de mudanças e incertezas climáticas reforça a importância do monitoramento de recursos hídricos. Alterações nos padrões de precipitação podem afetar a disponibilidade de águas superficiais, aumentando a demanda por recursos hídricos subterrâneos. O planejamento da utilização das águas subterrâneas nem sempre é incluído nos planos de gerenciamento, seja por falta de estudos em relação à dinâmica dos sistemas aquíferos ou estratégias eficazes de monitoramento. O Sistema Aquífero Bauru (SAB) é um dos principais mananciais subterrâneos disponíveis no oeste paulista. Esse trabalho apresenta a aplicação de modelos baseados em dados climáticos e de monitoramento de níveis do SAB em Assis/SP. A modelagem proposta caracterizou a dinâmica do SAB em relação às variações sazonais, subsidiando o entendimento dos processos de recarga na região e a gestão da água.

Palavras-Chave: água subterrânea; monitoramento; estatística; séries temporais; modelo PIRFICT.

ABSTRACT: The actual scenario of changing and uncertainty climate reinforce the importance of water resources monitoring. Changes in the precipitation patterns can affect the surface water, increasing the demand for groundwater resources. Groundwater use planning is not always included in the water management plans, for lack of reliable studies about the aquifer systems or efficient monitoring strategies. The Bauru Aquifer System (BAS) is one of the major groundwater reservoirs in the western paulista. This work presents the application of models based on climate data and water table depths monitoring series of BAS in the municipality of Assis/SP-Brazil. The proposed modelling characterized the BAS dynamic in relation to seasonality variations, subsidizing the understanding of the recharge processes in the region and the water management itself.

Key words: groundwater; monitoring; statistics; time series; PIRFICT model.

Introdução

A água é um recurso natural fundamental para a nossa sobrevivência, é responsável por proporcionar o desenvolvimento econômico e o nosso bem estar social, além de ser indispensável para os ecossistemas da natureza. É um recurso abundante, porém limitado, encontrado em diferentes formas, em variados lugares e possui distintas finalidades, tais como os usos domésticos, usos na agricultura, usos industriais, abastecimento de cidades e a geração de energia. Com o presente quadro de mudanças climáticas globais, a tendência é que os padrões de chuva se modifiquem e os eventos de chuva sejam mais esparsos, porém ainda mais intensos (IPCC, 2007). A demanda de água é cada vez maior e as tendências para próximas décadas é que essa demanda continue a atingir valores cada vez maiores, devido ao avanço populacional e elevação do nível de vida. Alterações nos padrões de precipitação podem afetar a disponibilidade de águas superficiais, aumentando a demanda por recursos hídricos subterrâneos. Sabendo da importância que a água exerce para a sociedade, os aquíferos despertam grande interesse ambiental em relação a sua

1 Licenciada em Geografia pela UNESP/Ourinhos (2010) e bacharel em Geografia pela UNESP/Ourinhos (2011). Atualmente é aluna de mestrado do curso de pós-graduação em Agronomia da UNESP/FCA, área de concentração em Irrigação e Drenagem. E-mail: brusoldera@hotmail.com

2 Engenheiro agrônomo, docente na UNESP - Campus de Ourinhos, onde ministra aulas nas áreas de climatologia, agrometeorologia e recursos hídricos junto ao Curso de Geografia. Mestre em agronomia pela UNESP/FCA e doutor em sensoriamento remoto pelo INPE. E-mail: manzione@ourinhos.unesp.br

conservação, e com isso tem surgido à preocupação de desenvolver o monitoramento das águas subterrâneas, o que até a pouco só era notado para as águas superficiais. O monitoramento vem se tornando uma ferramenta fundamental para diagnosticar o atual estado do aquífero, para tomar as devidas medidas em relação a modificações causadas por efeitos naturais ou antrópicos. Pode ser realizado por meio de medidas de seus níveis freáticos, que irão fornecer informações sobre a dinâmica do mesmo. A avaliação do comportamento do aquífero através de seu 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 para as futuras gerações. Através do monitoramento e posteriormente por modelos hidrológicos podemos entender melhor o comportamento dos aquíferos e sua relação com as mudanças e incertezas climáticas, como as alterações relacionadas principalmente a precipitação podem afetar a disponibilidade de água superficial e por consequência refletir nas águas subterrâneas.

Segundo o relatório da ONU (2003) aproximadamente 70% da água consumida no mundo é designada à irrigação e agricultura, 22% para as indústrias e apenas 8% para uso urbano. A destinação de água para agricultura é alta em benefício da crescente necessidade de alimentos e também do desperdício com técnicas de irrigação e produção antiquadas. Informações sobre resposta do sistema de água subterrânea às variações climáticas sazonais, bombeamentos e/ou recarga artificial são necessárias para identificar políticas adequadas de gerenciamento dos recursos hídricos disponíveis. A necessidade de dados históricos e pessoal com alta qualificação para analisá-los, leva a uma difícil questão, que é prever a resposta de um aquífero (em termos de quantidade e qualidade) quanto às atividades de exploração propostas (SILVA & PRUSKI, 2000; CAMPOS & STUDART, 2003; COSTA, 2008), e em tempo hábil para gerar políticas racionais de exploração em determinada região. Isso faz com que muitas vezes as águas subterrâneas não sejam incluídas no planejamento e gestão de recursos hídricos, isto se torna importante uma vez que a implementação de uma política eficiente de gestão pública do recurso hídrico, no que diz respeito a um amplo planejamento ambiental que vise o desenvolvimento sustentável é de fundamental relevância para o estudo e aprofundamento das variáveis ambientais. Há de se tomar cuidado na avaliação dessas reservas à medida que a economia brasileira fica cada vez mais dependente da atividade agrícola. A vulnerabilidade da atividade ocorre quando novos cultivos são introduzidos em áreas onde nunca foi registrada sua ocorrência sem estudo prévio da disponibilidade e demanda hídrica das culturas agrícolas.

O presente estudo procurou através da análise de dados de monitoramento do Sistema Aquífero

Bauru (SAB), compreender a resposta do aquífero em função das variações climáticas sazonais, em uma área de estudo localizada sob a formação Adamantina, no município de Assis/SP. Para haver uma eficiente gestão e o planejamento dos recursos hídricos deve-se pensar em políticas que sejam eficientes e adequadas às incertezas e variações do regime hídrico. Para isso procurou-se modelar a relação dinâmica entre o saldo hídrico e a variação dos níveis freáticos a partir de modelos baseados em séries temporais, identificando quais os principais elementos que interferem na oscilação dos níveis freáticos no SAB na área de estudo, e a partir disso inferir sobre a dinâmica dos níveis freáticos do SAB, um dos principais mananciais subterrâneos disponíveis na região do Oeste Paulista.

Materiais e Métodos

a) Área de estudo

O município de Assis (SP) ocupa 461 Km² da porção oriental do Estado de São Paulo, região administrativa 04 – Marília. Está situada geograficamente pelas coordenadas 22° 40' S e 50° 25' W, com altitude de 556 metros acima do nível do mar. Geograficamente favorecido por uma economia diversificada, nas áreas da agricultura, comércio e prestação de serviços, o município ainda desponta como grande centro educacional e tecnológico na região do Médio Paranapanema (UGRHI-17). Segundo a classificação climática de Köppen, Assis-SP encontra-se em uma região de transição entre dois tipos climáticos: Cwa (tropical com a concentração de chuvas no verão, que é rigoroso, com temperatura média do mês mais quente superior a 22 °C) e Cfa (tropical, sem estação seca). A pluviosidade média anual é maior que 1400 mm/ano, com concentração de chuvas entre os meses de novembro e abril (BONGIOVANNI, 2008). Entre junho e setembro, chove apenas 15% do total anual, época em que os solos se tornam deficitários em água e os rios têm seus níveis mais baixos.

Assis está posicionado na porção centro nordeste da Bacia do Paraná. Bongiovanni (2008) cita debates sobre aspectos estruturais e tectônicos da Bacia do Paraná. Ao longo de sua evolução, a bacia teve sua configuração alterada por alinhamentos, flexuras e arqueamentos do embasamento que influenciaram a compartimentação e a acumulação dos sedimentos do Grupo Bauru, sob o substrato basáltico. 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). Para Suguio (1980), o Grupo Bauru abrange as seguintes unidades estratigráficas: Formação Caiuá, Formação Santo Anastácio, Formação Araçatuba, Formação São José do Rio Preto, Formação Uberaba e Formação Marília. No trabalho do IPT (1981), os autores consideram que o Grupo Bauru é subdividido em quatro formações: Caiuá, Santo Anastácio, Adamantina e Marília. Na região em estudo, onde se localiza o município de Assis, as unidades litoestratigráficas presentes são constituídas por rochas ígneas (pertencentes à Formação Serra Geral) e rochas sedimentares (da Formação Adamantina), ambas de idade predominantemente mesozóica; e por depósitos sedimentares recentes, de idade cenozóica (Figura 1).

e em parte por depósitos cenozóicos. Esta unidade estratigráfica contempla 41,45% de área aflorante no Médio- Paranapanema. 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. Bongiovanni (2008) reclassificou o mapa exibido na Figura 1, incluindo as coberturas cenozóicas da aloformação Paranavaí e regiões aluvionares. Sendo assim, no município afloram rochas das formações Serra Geral, Adamantina e sedimentos atribuídos à Aloformação Paranavaí, unidades que se encontram parcialmente cobertas por solo, normalmente recente e de pequena espessura. Ainda segundo Bongiovanni (2008), no município predominam as classes de solos Latossolo, Argissolo, Nitossolo, Neossolo e Gleissolo, sendo que 80% da área do município têm predominância da classe dos Latossolos. Recobrimdo praticamente todo o município de Assis, encontram-se sedimentos inconsolidados com coloração variando de vermelho intenso a vermelho alaranjado a amarelo pálido, com baixos teores de argila, denominadas por Sallun et al. (2008) de Aloformação Paranavaí.

Os poços estudados estão localizados nas dependências da APTA (Agencia Paulista de Tecnologia dos Agronegócios – Polo Médio Paranapanema), coordenadas 22°38'S e 50°23'O (Figura 2). Os solos no local são de acordo com estudos de Bongiovanni (2008) pertencentes a um grupamento indiferenciado de Latossolo Vermelho Distrófico típico, textura média e Neossolo Quartzarênico Órtico típico, ambos A moderado. Esses solos encontram-se sobre a aloformação Paranavaí, depositada sobre os sedimentos da formação Adamantina, pertencente ao Grupo Bauru.

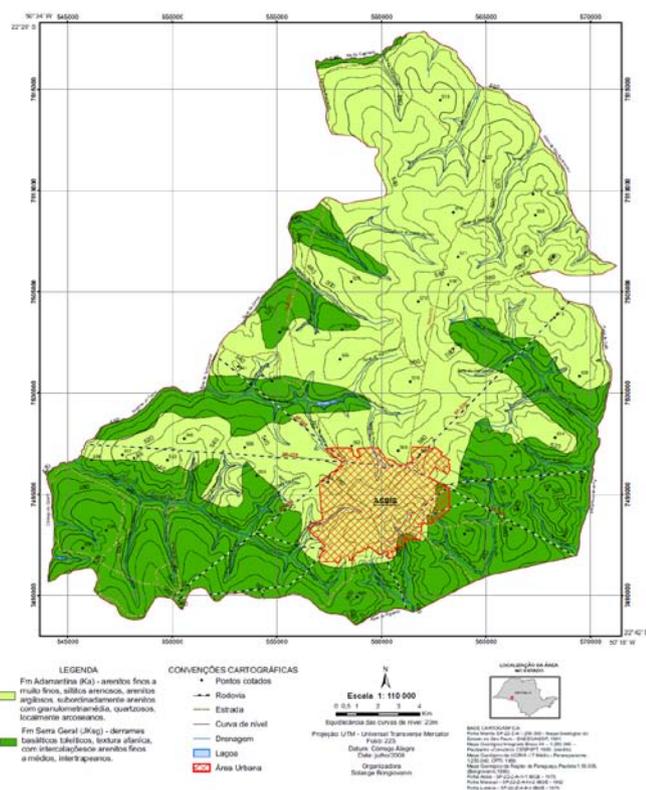


Figura 1: Mapa geológico do município de Assis (SP).
Fonte: CPTI, 1999

A Formação Adamantina aflora em vasta extensão do oeste paulista, recobrimdo 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

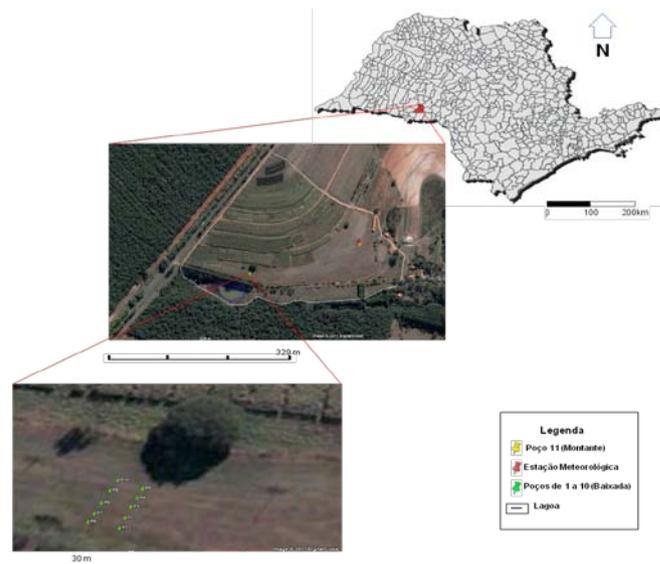


Figura 2: Imagem do satélite Quickbird com a área de estudo em destaque. Fonte: Google Earth

b) Dados disponíveis

Em virtude do projeto de “Ampliação e modernização da rede de monitoramento hidrológico na região do CBH-MP”, foram perfurados 11 poços de monitoramento com verbas do Fundo Estadual de Recursos Hídricos (FEHIDRO). Esses poços são monitorados sistematicamente pelo Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo (DAEE) desde março de 2008.

A coleta de dados de altura dos níveis freáticos foi realizada em frequência quinzenal desde 31/03/2008 até 07/04/2011. Junto com as séries temporais de oscilação dos níveis freáticos, foram utilizadas séries temporais de precipitação e evapotranspiração potencial coletadas pelo próprio IAC e disponibilizadas através do sistema do Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas CIIAGRO online (<http://www.ciiagro.sp.gov.br/ciiagroonline/>) em uma frequência diária desde 08/01/2008 a 27/04/2011.

c) Modelagem das séries temporais de monitoramento dos níveis freáticos

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 & KNOTTERS, 2004). Em hidrologia, a dinâmica do lençol freático tem sido explicada de diversas formas. No campo das análises de séries temporais, modelos de função de transferência de ruído (transfer-function noise models-TFN) têm sido aplicados para descrever a relação dinâmica entre a precipitação excedente e as alturas de lençol freático (BOX & JENKINS, 1976; HIPEL & McLEOD, 1994; TANKERSLEY & GRAHAM, 1994; VAN GEER & ZUUR, 1997; YI & LEE, 2003). O sistema transforma séries de observações de entrada (variáveis explicativas) em séries de saída (variável de resposta, no caso alturas de lençol freático). Para alturas de lençol freático, a relação dinâmica entre a precipitação e as alturas do lençol podem também ser descritas por modelos físico-mecanísticos de fluxo. Entretanto, modelos muito menos complexos como os modelos de função de transferência de ruído geralmente obtêm predições tão acuradas quanto modelos físico-mecanísticos (KNOTTERS & BIERKENS, 2001).

d) O modelo PIRFICT

O comportamento de um sistema linear de entrada e saída pode ser completamente caracterizado por sua função de impulso e resposta (IR) (ZIEMER et al., 1998; VON ASMUTH et al., 2002). O modelo PIRFICT (Predefined Impulse Response Function In Continuous Time) é uma alternativa a modelos TFN em intervalos de tempo discretos apresentada por Von Asmuth et al. (2002). No modelo PIRFICT o pulso de entrada é transformado em uma série de saída por uma função de transferência em tempo contínuo. Os coeficientes dessa função não dependem da frequência de observação. Assumindo-se linearidade no sistema, uma série de alturas de lençol freático é uma

transformação de uma série de precipitação excedente, descontando a evapotranspiração potencial. Essa transformação é completamente governada pela função IR. Para o caso de um sistema linear simples, sem perturbações freáticas, que é influenciado somente pela precipitação excedente, o modelo TFN a seguir (escrito como uma convolução integral) pode ser usado para descrever a relação entre alturas de lençol freático e a precipitação excedente (VON ASMUTH et al., 2002):

$$h(t) = h^*(t) + d + r(t) \tag{1}$$

$$h^*(t) = \int_{-\infty}^t p(\tau)\theta(t-\tau)d\tau \tag{2}$$

$$r(t) = \int_{-\infty}^t \phi(t-\tau)dW(\tau) \tag{3}$$

onde: $b(t)$ é a altura de lençol freático observada no tempo t [T]; $b^*(t)$ é a altura de lençol freático predita no tempo t creditado ao excedente de precipitação relativa a d [L]; d é o nível de $b^*(t)$ sem a precipitação, ou em outras palavras o nível da drenagem local, relativo a superfície do solo [L]; $r(t)$ é a série dos resíduos [L]; $p(t)$ é a intensidade do excedente de precipitação no tempo t [L/T];

$\theta(t)$ é a função de transferência de impulso/resposta (IR) [-]; $\phi(t)$ é a função IR do ruído [-]; e $W(t)$ é um processo de ruído branco contínuo (Wiener) [L], com propriedades $E[dW(t)]=0$, $E[(dW(t))^2]=dt$, $E[dW(t_1)dW(t_2)]=0$, $t_1 \neq t_2$.

O nível da drenagem local d é obtido a partir dos dados como se segue:

$$d = \frac{\sum_{i=0}^N h(t_i)}{N} - \frac{\sum_{i=0}^N h^*(t_i)}{N} - \frac{\sum_{i=0}^N r(t_i)}{N} \tag{4}$$

sendo N o número de observações de alturas de lençol freático.

A área e forma da função IR depende muito das circunstâncias hidrologias *in situ*. $\theta(t)$ é uma função de distribuição Pearson tipo III (PIII df, ABRAMOWITZ & STEGUN, 1965). A opção por esse tipo de função se dá por sua natureza flexível, ajustando-se a uma grande gama de respostas hidrológicas. Assumindo-se linearidade, a componente determinística da dinâmica do lençol freático é completamente descrita pelos momentos da função IR. Nesse caso, os parâmetros podem ser definidos segundo Von Asmuth et al. (2002):

$$\theta(t) = A \frac{a^n t^{n-1} e^{-at}}{\Gamma(n)}$$

$$\phi(t) = \sqrt{2\alpha_r^2} e^{-\alpha t} \tag{5}$$

onde A , a , n , são os parâmetros da curva ajustada, $\Gamma(n)$ é a função Gamma e α controla a taxa de decaimento de $\phi(t)$ e σ_r^2 é a variância dos resíduos.

A equação 5 e seus parâmetros apresentam sentido físico como descrito em Von Asmuth & Knotters (2004). O parâmetro A é relacionado com a resistência a drenagem (a área da função IR é igual a razão entre a altura média do lençol freático e a recarga média). O parâmetro a é determinado pelo coeficiente de armazenamento do solo (porosidade) e n pelo tempo de convecção e dispersão da precipitação pela zona não saturada. As bases físicas são explicadas por funções de transferência de uma série de reservatórios lineares (NASH, 1958). O parâmetro n demonstra o número de reservatórios e a é igual ao inverso do coeficiente de reservatório normalmente usado. Como explicam Knotters & Bierkens (2000), um simples reservatório linear (PIII df com $n=1$) é igual a um simples modelo físico de coluna de solo unidimensional, descartando fluxo lateral e o funcionamento da zona não-saturada. Von Asmuth & Knotters (2004) chamam atenção para cuidados ao interpretar esses parâmetros da PIII df quanto a seu sentido físico no processo, uma vez que suas bases são empíricas.

O modelo PIRFICT é capaz de lidar com qualquer frequência de dados por ser contínuo no tempo. Além disso, o modelo PIRFICT oferece uma vantagem adicional ao calibrar modelos TFN em séries irregulares, comparado a modelos autorregressivos combinados ao filtro de Kalman (KNOTTERS & BIERKENS, 2000), já que o formato da função de transferência não é restrito a um formato exponencial (VON ASMUTH & BIERKENS, 2005). Originalmente formulado para descrever a variação dos níveis freáticos nos diques holandeses, o modelo PIRFICT demonstrou grande potencial de aplicação a realidade brasileira através dos estudos de Manzione (2010). A flexibilidade da função de impulso e resposta que estabelece a relação entre as variáveis climáticas e os níveis freáticos (Pearson III df) permite ao modelo se ajustar a diferentes sistemas hidrológicos, como no Cerrados brasileiros. As análises dos dados e do modelo PIRFICT foram realizadas utilizando os softwares R (<http://www.r-project.org/>) e Menyanthes (www.menyanthes.nl).

Resultados e Discussões

a) Calibração do modelo PIRFICT aos dados de monitoramento

O modelo PIRFICT foi calibrado para todas as séries de observação dos níveis freáticos, usando as séries históricas de precipitação e evapotranspiração como variáveis de entrada. A Figura 3 traz um exemplo da calibração do modelo para o poço de monitoramento 1. Já as estatísticas correspondentes às calibrações do modelo podem ser vistas na Tabela 1, e os parâmetros estimados pelo modelo PIRFICT e seus desvios padrões na Tabela 2.

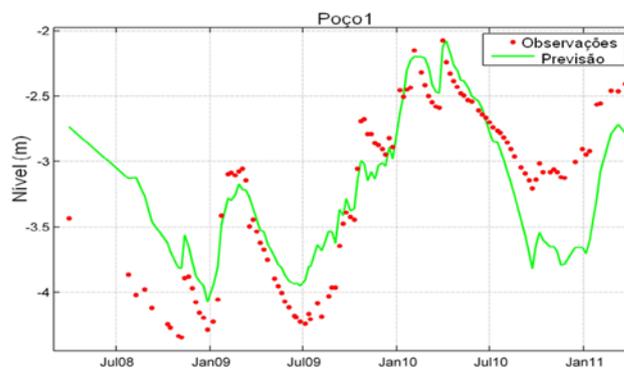


Figura 3: Modelo PIRFICT ajustados (linha) aos dados de observações de alturas de lençol freático (pontos) no poço de monitoramento 1
Org.: Os autores (2011)

Tabela 1: Estatísticas da calibração do modelo PIRFICT às séries temporais de alturas de lençol freático observadas no período de 31/03/2008 a 28/01/2010

POÇOS	EVP (%)	RMSE (m)	RMSI (m)
Poço 1	69,15	0,359	0,105
Poço 2	71,18	0,349	0,112
Poço 3	71,74	0,347	0,114
Poço 5	82,58	0,141	0,085
Poço 6	66,33	0,388	0,116
Poço 7	68,69	0,372	0,125
Poço 8	65,99	0,385	0,118
Poço 9	69,61	0,358	0,127
Poço 11	91,33	0,197	0,095

EVP=percentual da variância explicada pelo modelo; RMSE=raiz do erro quadrático médio; RMSI=raiz das inovações quadráticas médias. Org.: Os autores (2011).

Tabela 2: Parâmetros estimados a partir da calibração do modelo PIRFICT

POÇOS	A	A	N	E	A
Poço 1	1436	0,002608	1,083	1,56	126,78
Poço 2	1404	0,002737	1,098	1,61	125,03
Poço 3	1491	0,002572	1,090	1,66	127,36
Poço 5	1374	0,001186	1,031	-1,41	18,97
Poço 6	2082	0,001573	0,992	1,67	116,16
Poço 7	1479	0,002604	1,080	1,60	118,30
Poço 8	2027	0,001648	1,002	1,62	125,81
Poço 9	1465	0,002645	1,100	1,64	113,26
Poço 11	831,5	0,006926	1,377	0,89	58,20

A =resistência a drenagem (metros); a =coeficiente de armazenamento no solo (1/dias); n =tempo de convecção/dispersão (dias); E =fator de correção da evapotranspiração (-); α =ruído branco. Org.: Os autores (2011).

Tabela 3: Condutividade hidráulica a campo determinada pelos ensaios de permeabilidade

Área	K_{fs} (cm/s)	K_{fs} (cm/dia)
Baixada	0,000527901	45,610632
Montante	0,00004424	3,82212

K_{fs} = condutividade hidráulica a campo
Org.: Os autores (2011).

O modelo PIRFICT apresentou ajustes razoáveis, com uma porcentagem da variância explicada pelo modelo (EVP) variando entre 65% e 91%. Os erros estimados (RMSE e RMSI) foram baixos, inferiores a 30 cm. Em séries curtas como as estudadas, é normal ter ajustes com variações como às observadas, pois a série não possui um grande número de dados, (monitoramento correspondente a três anos) e com isso inferir na variação se torna mais difícil pela representatividade dos dados (MANZIONE, 2010). Os poços localizados na região mais baixa da área apresentam níveis mais superficiais e, conseqüentemente, mais sensíveis às variações sazonais da precipitação e evapotranspiração.

Os parâmetros calibrados mostraram-se similares, em virtude do comportamento semelhante dos poços que estão localizados próximos uns dos outros. Somente os poços 5 e 11 apresentaram valores discrepantes mesmo com um ajuste considerado razoável. Em casos como esse onde a série é curta, o modelo não consegue descrever a relação dinâmica entre os dados de entrada (precipitação e evapotranspiração) e a oscilação dos níveis, e, conseqüentemente falha ao tentar ajustar os parâmetros do modelo (MANZIONE, 2010). Os parâmetros são dependentes da forma da função de impulso e resposta que descreve o fenômeno. Chama-se a atenção para o parâmetro A que é um indicativo da resistência a drenagem (ou condutividade hidráulica) que o meio poroso exerce sobre a frente de molhamento da zona vadosa e da zona saturada até a resposta do aquífero. Esse parâmetro apresentou valores em torno de 1300 e 1500 dias para os poços 1, 2, 3, 5, 7 e 9, e acima de 2000 para os poços 6 e 8. Esses valores podem ser interpretados como o tempo que a água demora a atingir a zona saturada e exercer alguma reação nos níveis. Como o poço 11 é mais profundo e apresentou valor de 831,5 dias para o parâmetro A , esperar-se-ia que os valores para os poços da baixada mais superficiais fossem inferiores, por reagirem mais rápido aos pulsos de precipitação e evapotranspiração. Entretanto o que se viu foi o contrário, demonstrando que algo além da precipitação e da evapotranspiração exerce influência na nesses poços da baixada. Von Asmuth et al. (2008) explica que múltiplos estresses podem causar influência nos níveis e podem ser considerados no modelo PIRFICT, como um rio próximo ou poços de bombeamento. Devido à natureza empírica das funções de impulso e resposta utilizadas na calibração desses modelos, deve-se tomar

cuidados para interpretar seus parâmetros (VON ASMUTH & KNOTTERS, 2004).

Os demais parâmetros também apresentaram valores semelhantes. O poço 11 por ser mais profundo apresentou valores de n (tempo de convecção/dispersão) maiores, já que o meio poroso a ser atravessado é maior, e conseqüentemente um ruído \square menor por sofrer menos interferências externas. Manzione et al. (2009) apresentam um estudo comparando dois poços distantes 10 metros um do outro, mas em profundidades diferentes, em uma área de recarga do Aquífero Guarani. Os autores concluem que os parâmetros do modelo são fortemente influenciados pela espessura do meio poroso a ser atravessado pela água para que haja alguma resposta do aquífero. O parâmetro E , segundo Von Asmuth et al. (2002) não deve ser maior que 3, ratificando o bom desempenho do modelo nas áreas de monitoramento do Aquífero Bauru na Formação Adamantina. No caso do poço 5 onde os valores foram negativos se explica pela falta de dados para representar o fenômeno.

As séries climáticas utilizadas como dados de entrada do modelo que explica a oscilação dos níveis freáticos foram eficazes na caracterização da resposta do Sistema Aquífero Bauru (SAB) na área de estudo, sendo importantes ferramentas para o monitoramento de variáveis agro-ambientais.

b) Movimento da água no solo e sua relação com a oscilação dos níveis freáticos

Para validação dos modelos ajustados, procurou-se relacionar algum parâmetro fisicamente embasado do modelo PIRFICT com dados observados a campo. Assim, procurando entender a dinâmica da água no solo e do aquífero na área de estudo, foram realizados dois ensaios de permeabilidade, um próximo ao poço 11 (montante) e outro entre os poços da baixada. Para isso utilizou-se um permêmetro tipo Guelph, segundo metodologias estabelecidas por Reynolds e Elrick (1986). Um dos parâmetros fornecidos pelo permêmetro de Guelph é a condutividade hidráulica a campo (K_{fs}). A determinação de K_{fs} indica a velocidade da água no interior do solo em condições de saturação, e está intimamente ligada ao parâmetro A do modelo. Os valores da permeabilidade do solo nas proximidades dos poços medidos a campo podem ser visualizados na Tabela 4, indicando a velocidade com que a água se move no solo em cm/s e cm/dia.

Os valores de K_{fs} na região da baixada foram muito superiores comparados com os valores na área a montante, indicando um movimento da água mais rápido nessa parcela justamente pelos níveis serem mais superficiais. O mesmo foi observado nas calibrações do modelo PIRFICT, indicando que ele foi eficaz ao capturar o processo que ocorre no solo em função da oscilação dos níveis. Essa

diferença entre os valores se dá, sobretudo devido ao relevo e a existência de uma lagoa próxima a região de baixada onde estão os poços 1 a 10. O relevo exerce um gradiente potencial de movimento da água para a baixada, o que faz com que a área possua uma parcela com fluxo subsuperficial constante. A lagoa naturalmente acaba por influir na dinâmica da infiltração e do movimento da água no solo, atuando como um facilitador natural do fluxo na região, e também notou-se que a textura dos solos na baixada é mais arenosa que na área a montante, alterando a sua porosidade (o espaço poroso, o tamanho dos poros e sua distribuição) e consequentemente também facilitando o movimento da água.

Os aquíferos têm importante participação no que diz respeito às questões ambientais, sobretudo a sua preservação. Deste modo houve a necessidade de se desenvolver o monitoramento das águas do Sistema Aquífero Bauru (SAB), pois a averiguação permite fazer o diagnóstico do estado em que se encontra e intervir para melhorar tanto a qualidade como quantidade. Por meio do monitoramento podemos também desenvolver ferramentas, que ajudem a integrar os órgãos gestores com a população em geral, que é imprescindível já que o manancial subterrâneo é cada vez mais utilizado para o abastecimento público. Porém nem sempre isto acontece, seja pelo desinteresse da população ou pela dificuldade de se transmitir os dados em estudo, e uma forma para solucionar este problema pode através de audiências e seminários públicos, fóruns, web sites, e campanhas de proteção tanto dos aquíferos como de seus poços. Em termos práticos, recomenda-se estender esse tipo de análise a outros poços da região ou mesmo outros domínios aquíferos livres para avançar no conhecimento da dinâmica das águas subterrâneas

Conclusões

A partir dos resultados apresentado, pôde-se concluir que:

- O modelo PIRFICT se ajustou bem aos dados de monitoramento dos níveis freáticos na Formação Adamantina do Aquífero Bauru na área experimental em Assis/SP;

- Os poços que se localizam em área de baixada são mais rasos e mais sensíveis as variações sazonais da precipitação e evapotranspiração;

- O poço 11 que apresenta um meio poroso é maior tem menores variações das oscilações dos níveis aos impulsos de precipitação e evapotranspiração;

- O relevo das áreas de estudo condiciona dinâmicas distintas dos poços de monitoramento do SAB. A área de baixada próxima o curso d'água acaba atuando como um facilitador do fluxo na área; e

- Com uso dos dados de monitoramento dos níveis freáticos do SAB e de modelos estatísticos, pode-se

compreender a relação entre as variações climáticas e características hidrogeológicas locais (relevo, e/ou mesmo outro curso hídrico próximo aos poços), fornecendo informações a respeito de sua dinâmica e relações com as forças que interferem nas oscilações dos níveis na região e assim conhecer melhor o comportamento do SAB na área estudada, criando subsídios para sua gestão na região.

Agradecimentos

Ao FEHIDRO (Fundo Estadual de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo) e à FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) – processo # 2010/07516-4, pelo auxílio financeiro que possibilitou o desenvolvimento deste trabalho, ao CIVAP (Consórcio Intermunicipal do Vale do Paranapanema) e à APTA (Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios – Polo Médio Paranapanema) pelo compartilhamento dos dados, e aos geólogos Emilio C. Prandi e Paulo C. Alexandrelli do DAEE (Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo) pelo apoio de campo.

Referências

- ABRAMOWITZ, M.; STEGUN, I. A. **Handbook of mathematical functions**. New York: Dover Publications Inc, 1965. 1046p.
- 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.
- BOX, G. E. P.; JENKINS, G. M. **Time series analysis: forecasting and control**. 2.ed. San Francisco: Holden-Day, 1976. 575p.
- CAMPOS, N.; STUDART, T. **Gestão das águas**: princípios e práticas. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos. 2003. 242 p.
- COSTA, W. D. Uso e gestão de água subterrânea. In: FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E. C.; DEMETRIO, J. G. **Hidrogeologia**: conceitos e aplicações. 3. ed. rev. e amp. Rio de Janeiro: CPRM/LABHID, 2008. p. 341-367.
- COOPERATIVA DE SERVIÇOS, PESQUISAS TECNOLÓGICAS E INDUSTRIAIS (CPTI). **Diagnóstico da situação dos Recursos Hídricos da UGRHI 17 – Médio – Paranapanema**: Relatório Zero. São Paulo, 1999. CD-ROM.
- HIPEL, K. W.; McLEOD, A. I. **Time series modelling of water resources and environmental systems**. Elsevier, Amsterdam, 1994. 1013p.
- INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2007**: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth

- Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. SOLOMON et al. (eds.) New York: Cambridge University Press, 2007. 142p.
- KNOTTERS, M.; BIERKENS, M. F. P. Physical basis of time series models for water table depths. **Water Resources Research**, v. 36, p. 181-188, 2000.
- MANZIONE, R. L.; MARCUZZO, F. F. N.; WENDLAND, E. C. Séries de evapotranspiração potencial para estimativas de níveis freáticos em área de recarga do Aquífero Guarani. In: Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 16, 2009, Belo Horizonte. **Mudanças climáticas, recursos hídricos e energia para uma agricultura sustentável**. Belo Horizonte: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 2009. p. 40.
- MANZIONE, R. L. **Regionalized spatio-temporal modelling of water table depths: a case study in the Brazilian Cerrados**. Köln: Lambert Academic Press, 2010.
- MEAULO, F. **Vulnerabilidade natural à poluição dos recursos hídricos subterrâneos da área de Araraquara (SP)**. 2004. 108p. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2004.
- NASH, J. E. Determining runoff from rainfall. **Proc. Inst. Civ. Eng.**, v.10, 1958. p. 163-184.
- ORGANIZATION OF AMERICAN STATES / GLOBAL ENVIRONMENT FACILITY (OAS/GEF). **Proyecto para la Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible Integrado del SAG**. Montevideo, 2001. 133p.
- ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). The UN World Water Development Report: Water for People, Water for Life – 2003. UNESCO/BERGHAIN, Paris, 2003, 535 p.
- SALLUN, A. E. M.; SUGUIO, K.; AZEVEDO SOBRINHO, J. M. Sedimentologia da Aloformação Paranavai, Bacia Hidrográfica do Alto Rio Paraná (SP, PR E MS). **Revista Pesquisas em Geociências**, Porto Alegre, 35 (1), 2008. p. 85-107.
- SILVA, D. D.; PRUSKI, F. F. **Gestão de recursos hídricos**. Aspectos legais, econômicos, administrativos e sociais. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa; Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos. 2000. 659 p.
- SUGUIO, K. **Rochas sedimentares: propriedades, gênese e importância econômica**. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1980. 500p.
- REYNOLDS, W. D.; ELRICK, D. E. A method for simultaneous in situ measurements in the vadose zone of field saturated hydraulic conductivity, sorptivity and the conductivity- pressure head relationship. **Ground water monitoring review**, v. 6, 1986. p. 84-95.
- TANKERSLEY, C. D.; GRAHAM, W. D. Development of an optimal control system for maintaining minimum groundwater levels. **Water Resources Research**, v. 30, 1994. p. 3171-3181.
- VAN GEER, F. C.; ZUUR, A. F. An extension of Box-Jenkins transfer/noise models for spatial interpolation of groundwater head series. **Journal of Hydrology**, v. 192, 1997. p. 65-80.
- VON ASMUTH, J. R.; BIERKENS, M. F. P.; MAAS, C. Transfer function noise modelling in continuous time using predefined impulse response functions. **Water Resources Research**, v. 38 (12), 2002. p. 23.1-23.12.
- VON ASMUTH, J. R.; KNOTTERS, M. Characterising groundwater dynamics based on a system identification approach. **Journal of Hydrology**, v. 296, 2004. p. 118-34.
- VON ASMUTH, J. R.; BIERKENS, M. F. P. Modelling irregularly spaced residual series as a continuous stochastic process. **Water Resources Research**, W12404, 2005. 41, p.
- VON ASMUTH, J. R.; MAAS, K.; PETERSEN, J. Modeling time series of ground water head fluctuations subjected to multiple stresses. **Ground water**. v. 46. n. 1, 2008. p. 30-40.
- YI, M.; LEE, K. Transfer function-noise modelling of irregularly observed groundwater heads using precipitation data. **Journal of Hydrology**, v. 288, 2003. p. 272-287.
- ZIEMER, R. E.; TRANTER, W. H.; FANNIN, D. R. **Signals and systems: continuous and discrete**. Upper Saddle River: Prentice-Hall, 1998. 622p.