

Integração de modelos espaciais e temporais para predições de níveis freáticos extremos

Rodrigo Lilla Manziane⁽¹⁾, Francisco Fernando Noronha Marcuzzo⁽²⁾ e Edson Cezar Wendland⁽³⁾

⁽¹⁾Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Campus Experimental de Ourinhos, Avenida Vitalina Marcusso, nº 1.500, CEP 19906-206 Ourinhos, SP. E-mail: manziane@ourinhos.unesp.br ⁽²⁾Ministério de Minas e Energia, Serviço Geológico do Brasil, Rua 148, nº 485, CEP 74170-110 Goiânia, GO. E-mail: francisco.marcuzzo@cprm.gov.br ⁽³⁾Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Hidráulica e Saneamento, Avenida Trabalhador São-carlense, nº 400, Caixa Postal 359, CEP 13566-590 São Carlos, SP. E-mail: ew@sc.usp.br

Resumo – O objetivo deste trabalho foi avaliar cenários de níveis freáticos extremos, em bacia hidrográfica, por meio de métodos de análise espacial de dados geográficos. Avaliou-se a dinâmica espaço-temporal dos recursos hídricos subterrâneos em área de afloramento do Sistema Aquífero Guarani. As alturas do lençol freático foram estimadas por meio do monitoramento de níveis em 23 piezômetros e da modelagem das séries temporais disponíveis de abril de 2004 a abril de 2011. Para a geração de cenários espaciais, foram utilizadas técnicas geoestatísticas que incorporaram informações auxiliares relativas a padrões geomorfológicos da bacia, por meio de modelo digital de terreno. Esse procedimento melhorou as estimativas, em razão da alta correlação entre altura do lençol e elevação, e agregou sentido físico às predições. Os cenários apresentaram diferenças quanto aos níveis considerados extremos – muito profundos ou muito superficiais – e podem subsidiar o planejamento, o uso eficiente da água e a gestão sustentável dos recursos hídricos na bacia.

Termos para indexação: água subterrânea, geoestatística, geoinformação, gestão de recursos hídricos, incertezas, modelo digital de terreno.

Integration of spatial and temporal models to predict extreme water table depths

Abstract – The objective of this work was to evaluate extreme water table depths in a watershed, using methods for geographical spatial data analysis. Groundwater spatio-temporal dynamics was evaluated in an outcrop of the Guarani Aquifer System. Water table depths were estimated from monitoring of water levels in 23 piezometers and time series modeling available from April 2004 to April 2011. For generation of spatial scenarios, geostatistical techniques were used, which incorporated into the prediction ancillary information related to the geomorphological patterns of the watershed, using a digital elevation model. This procedure improved estimates, due to the high correlation between water levels and elevation, and aggregated physical sense to predictions. The scenarios showed differences regarding the extreme levels – too deep or too shallow ones – and can subsidize water planning, efficient water use, and sustainable water management in the watershed.

Index terms: groundwater, geostatistics, geoinformation, water resource management, uncertainty, digital elevation model.

Introdução

A avaliação de cenários relativos à disponibilidade de recursos hídricos, superficiais ou subterrâneos, pode servir como subsídio para elaboração de documentos orientadores, formulação de políticas públicas para áreas estratégicas, racionalização da ocupação do território e redirecionamento de atividades para áreas com maior ou menor potencial produtivo. Técnicas de análise espacial de dados geográficos são ferramentas de grande valia na gestão agroambiental frente ao grande volume de dados atualmente disponíveis (Druck

et al., 2004). Dados oriundos de satélites, sensores embarcados, estações de monitoramento e amostras de campo são abundantes e podem refletir situações inerentes aos sistemas agrícolas, antes impossíveis de ser mensuradas.

As geotecnologias aliam informação e seus tratamentos estatísticos para o diagnóstico local e regional de áreas. Entretanto, é preciso estimular a integração de fontes de informações nos modelos de predição espacial, para melhorar as estimativas e diminuir a incerteza dos resultados. À medida que os problemas ficam mais complexos, aumenta a

necessidade do uso de técnicas avançadas para resolver problemas específicos (Oliver, 2010).

Algumas variáveis de difícil mensuração ou com alto custo de aquisição podem ser usadas em modelos que utilizem fontes de informação auxiliar. Quando há disponibilidade de informações auxiliares, é possível melhorar a acurácia das predições espaciais, estimar padrões espaciais mais plausíveis e atribuir sentido físico aos mapas resultantes com uso de produtos, como os modelos digitais de terreno (MDT) e as imagens de satélite classificadas (Odeha et al., 1994; Hengl et al., 2004; Bogaert & Fasbender 2007; Manzione et al., 2010; Peeters et al., 2010). A partir dessas estimativas, é possível elaborar cenários na forma de mapas.

Países, como a Bélgica, têm utilizado sistemas de informações geográficas (SIG) para implementação de diretrizes da União Europeia sobre o uso do solo pela agricultura e a contaminação das águas subterrâneas, com vistas a delinear os corpos hídricos e proteger a quantidade e a qualidade de água disponível (Cools et al., 2006). De acordo com Jha et al. (2007), uma série de dificuldades são enfrentadas por países em desenvolvimento para implementar, na prática, a integração de produtos de sensoriamento remoto, dados de monitoramento, MDT e outras fontes de informação em ambiente SIG. Estes autores consideram as perspectivas promissoras, mas alertam para a necessidade de se popularizar essas técnicas para que se avance na utilização de produtos geoespaciais, em pesquisa aplicada a recursos hídricos e naturais. Problemas na interpretação de dados geoespaciais, em decorrência da falta de modelos de predição eficazes ou da falta de profissionais treinados para usá-las, contribuem para a falta de consenso sobre medidas estratégicas de tomada de decisão na gestão de recursos hídricos (Nourani et al., 2011). Além de popularizar e divulgar as técnicas disponíveis para tratar informações espaciais, é necessário estimular a transferência de conhecimento nessa área e incentivar o treinamento frequente de profissionais (Renard, 2007).

Informações sobre a dinâmica de níveis freáticos são importantes para balancear os interesses econômicos e ecológicos quanto ao uso do solo e da água (Asmuth & Knotters, 2004). No caso de dados de poços de monitoramento de níveis freáticos, as informações são escassas, mas essenciais para o sucesso de sistemas agrícolas instalados sobre reservas de água subterrânea.

O objetivo deste trabalho foi avaliar cenários de níveis freáticos extremos, em bacia hidrográfica, por meio de métodos de análise espacial de dados geográficos.

Material e Métodos

Este estudo integrou diferentes fontes de informação dentro de modelos de séries temporais e de modelos espaciais na Bacia do Ribeirão da Onça, localizada em área de afloramento e recarga do Sistema Aquífero Guarani (SAG), no Município de Brotas, SP (22°10' e 22°15'S; 47°55' e 48°0'W) (Figura 1). O clima da região, segundo a classificação de Koeppen é do tipo Cwa, tropical úmido, controlado pelas massas de ar equatorial e tropical, com períodos seco (maio a outubro) e úmido (novembro a abril).

O Ribeirão da Onça é um dos formadores do Rio Jacaré-Guaçu, afluente do Rio Tietê pela margem direita. A bacia apresenta arenitos aflorantes originários da Formação Botucatu, com arenitos da Formação Pirambóia mais profundos. Os solos provenientes desse arenito desagregado apresentam composição homogênea, sem a presença de argilas, com exceção da região próxima ao exutório da bacia. A região é de extrema importância por apresentar características representativas típicas da região de afloramento do SAG, no Estado de São Paulo, e por sua alta representatividade como possível área de recarga do sistema (Wendland et al., 2007).

Os níveis da água subterrânea foram observados, quinzenalmente, em 23 poços distribuídos ao longo da bacia (Figura 1). Os poços estão localizados em regiões de diferentes ocupações do solo (eucalipto, cana-de-açúcar, pastagens, vegetação nativa de Cerrado e citros), o que permitiu a observação das variações dos níveis freáticos sob diferentes exigências hídricas.

O monitoramento dos níveis freáticos teve início em abril de 2004, compondo série histórica contínua até abril de 2011, o que totalizou sete anos de monitoramento. Na estimativa da evapotranspiração, utilizaram-se séries de precipitação e dados climatológicos disponíveis na Estação Climatológica do Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada, da Universidade de São Paulo. As séries foram utilizadas como variáveis explicativas no modelo de oscilação dos níveis freáticos, com início em 1974, o que totalizou 38 anos de monitoramento.

A evapotranspiração potencial foi calculada pelo método padrão FAO Penman-Monteith (Allen et al.,

1998). As séries de evapotranspiração calculadas foram corrigidas em função do coeficiente (K_c) das vegetações que circundam os poços. Além das séries temporais de monitoramento, utilizou-se MDT em escala 1:10.000, para geração de cenários relativos aos níveis freáticos.

As variações do nível freático foram descritas ao se assumir que diferenças espaciais, na dinâmica da superfície livre, foram determinadas pela variação espacial das propriedades do sistema, enquanto sua variabilidade temporal foi dada pela dinâmica das variáveis de entrada no sistema (Knotters & Bierkens, 2001). Utilizou-se modelo de função de transferência de ruído (“transfer-function noise models”, TFN), que transformou séries de observações de entrada (variáveis explicativas) em séries de saída (variável de resposta, no caso, níveis freáticos).

O modelo “predefined impulse response function in continuous time” (PIRFICT), introduzido por Asmuth et al. (2002), foi simulado em cada poço de monitoramento, tendo-se gerado novas séries na forma de funções de distribuição de probabilidade (FDP), contendo possíveis valores extremos dos níveis para qualquer data do calendário agrônomo. Para implementação do modelo PIRFICT, foi utilizado o programa Menyanthes (KWR Waterware, 2012). Neste

modelo, o comportamento do sistema de entrada e saída foi caracterizado por sua função de impulso e resposta (IR), estabelecida a partir da relação entre a hidrogeologia local e as séries de monitoramento. Foram geradas 1.000 séries temporais, e, em seguida, selecionou-se a data de 12 de outubro para interpolação. Assim, para cada um dos 23 poços, foi calculada uma FDP cujos valores médios e valores considerados extremos (percentis 5 e 95 da FDP) foram analisados. Escolheu-se essa data em razão da sua importância no calendário agrônomo da região, quando ocorrem as primeiras chuvas da estação e, conseqüentemente, os primeiros plantios.

Para a estimativa das alturas do lençol freático, em toda a área da bacia, e a geração de cenários na forma de mapas, o MDT foi incorporado como variável auxiliar. Nesse procedimento, utilizou-se krigagem universal disponível no pacote Gstat do programa de linguagem de programação estatística R (R Development Core Team, 2012). O modelo de krigagem universal divide a função aleatória em uma combinação linear de funções determinísticas, conhecidas em quaisquer pontos da região, e em um componente aleatório que é uma função aleatória dos resíduos. O MDT foi incorporado como uma deriva no modelo de predição espacial,

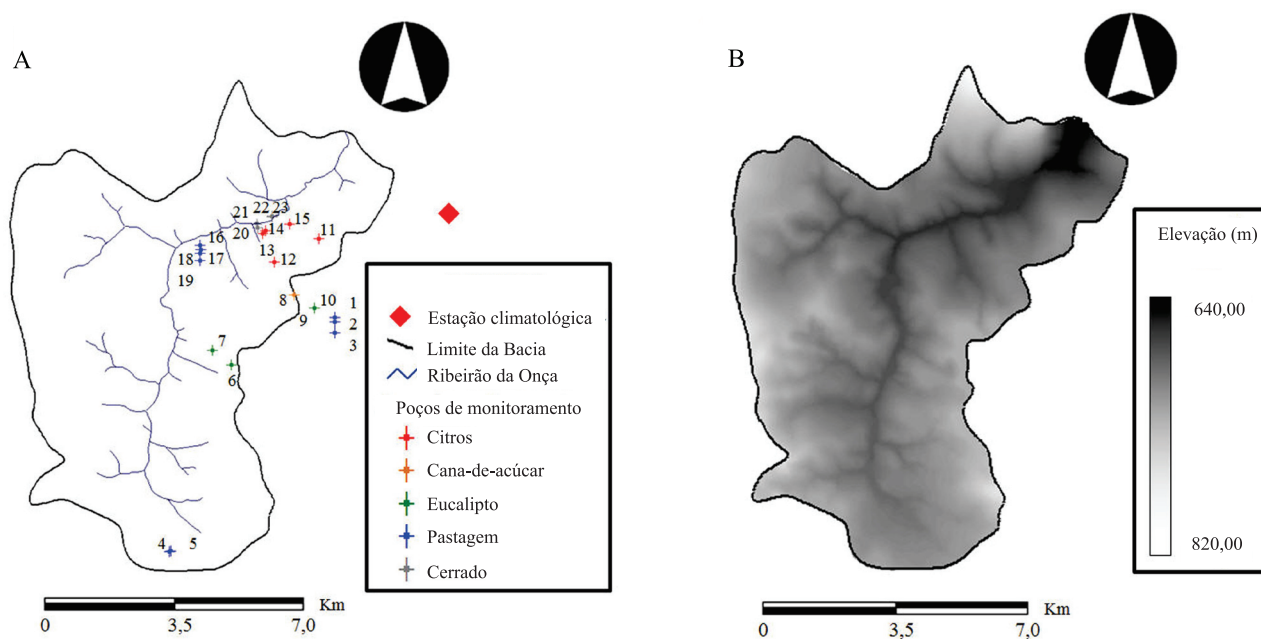


Figura 1. Distribuição dos poços e instrumentos de monitoramento (A), e modelo digital de terreno da área de estudo (B).

ao se assumir relação linear entre níveis freáticos e altimetria.

Sendo as alturas de lençol freático dadas como $z(x_1)$, $z(x_2)$, ..., $z(x_n)$, em que x_i é a localização do poço e n é o número de observações, em um novo e não visitado local x_0 na área, $z(x_0)$ foi predito ao se somar a deriva predita e os resíduos interpolados (Pebesma, 2006; Hengl et al., 2007):

$$\hat{z}(x_0) = \hat{m}(x_0) + \hat{e}(x_0) \quad (1),$$

em que a deriva m foi ajustada por regressão linear, e os resíduos e foram interpolados por krigagem:

$$\hat{z}(x_0) = \sum_{k=0}^p \hat{\beta}_k \times q_k(x_0) + \sum_{i=1}^n w_i(x_0) \times e(x_i); q_0(x_0) = 1 \quad (2).$$

Neste caso, os coeficientes β_k foram estimados pelo modelo de deriva; $q_k(x_0)$ é a k -ésima variável explicativa externa (preditiva) na localização x_0 ; p é o número de preditores; $w_i(x_0)$ são os pesos do sistema de krigagem; e $e(x_i)$ são os resíduos da regressão com média zero.

O sistema de krigagem foi resolvido para cada nó da malha (grid) como uma função baseada na relação entre os níveis de água subterrânea e a altitude do terreno naquele ponto:

$$\hat{h}(x_0) = \beta_0 + \beta_1 E(x_0) + e(x_0) \quad (3),$$

em que h é a altura do lençol predita na posição x_0 ; E é o valor da elevação do terreno; β_0 e β_1 são os coeficientes da regressão; e e é um resíduo correlacionado espacialmente, com média zero.

Essa estrutura de correlação espacial, caracterizada pelo semivariograma estimador da dependência espacial entre os pontos observados, forneceu informação para o sistema de krigagem realizar a interpolação espacial. Os resultados da interpolação espacial foram avaliados por validação cruzada (Wackernagel, 2003; Pebesma, 2004).

Resultados e Discussão

O modelo PIRFICT mostrou-se uma escolha adequada para a modelagem das séries temporais de monitoramento freático. A dinâmica do lençol freático tem sido explicada de diversas formas, e a relação entre precipitação, evapotranspiração e níveis freáticos pode ser descrita por diversos tipos de modelos de séries temporais (Tankersley & Graham, 1994; Van Geer &

Zuur, 1997; Yi & Lee, 2004). A adoção do modelo PIRFICT se deu principalmente pela flexibilidade da função IR, que se ajusta a diversas condições hidrogeológicas locais e a diferentes respostas do lençol, que, por sua vez, dependem de tipo de solo, porosidade, resistência a drenagem, uso do solo ou mesmo bombeamentos (Asmuth & Knotters, 2004).

As calibrações dos 23 piezômetros apresentaram percentagem de variância explicada pelo modelo (R^2) de 79,53%. Asmuth et al. (2008) calibraram o modelo PIRFICT para situação semelhante, com séries de entrada de precipitação e evapotranspiração como variáveis de entrada, na província de Linburg, Holanda, e obtiveram resultados com R^2 de 92%. Estes autores concluíram que, à medida que mais séries são introduzidas no modelo para explicar a oscilação dos níveis, os ajustes apresentam menores valores de R^2 (valor mediano de 85,9%) e maiores amplitudes nos ajustes; portanto, a dinâmica do aquífero foi mais bem caracterizada por envolver mais variáveis no modelo. Yihdego & Webb (2011) compararam o desempenho do modelo PIRFICT, em 82 piezômetros, no sudoeste da Austrália, ao de outro modelo de séries temporais (modelo autoagressivo HARTT) e consideraram o PIRFICT superior, por apresentar menores erros (R^2 mediano de 90%) em razão do ajuste seletivo da função IR. A variância medida pelo semivariograma foi baixa, quando utilizada a variável auxiliar (Figura 2). O patamar do semivariograma decaiu de 95,5 (contribuição + efeito pepita) para 35, com contribuição de apenas 30. Ou seja, a variância medida pelo semivariograma diminuiu em 68,25% com uso da elevação como variável auxiliar (Tabela 1). Isso se deve ao fato de as variáveis envolvidas na análise apresentarem forte correlação linear. O coeficiente de correlação (r) entre alturas de lençol freático e altimetria, para a data em análise (12 de outubro), foi de 0,72. A validade e a confiabilidade de análises sobre águas subterrâneas dependem fortemente da disponibilidade de grandes volumes de informação e dados de alta qualidade (Cogu et al., 2001).

Goovaerts & Kerry (2010) relataram o uso de variáveis auxiliares para melhorar estimativas de propriedades do solo e de produção, ao diminuir a variância dos dados, com menores custos. Quando esses dados não estão disponíveis, o uso de variáveis indiretas e de baixo custo é uma solução interessante, já

que ambientes de SIG proporcionam ferramentas para integração de diferentes fontes de informação.

Os resultados da análise variográfica são indicativos de que a confiabilidade nas estimativas e a acurácia do modelo foram maiores ao se utilizar variável auxiliar na estimativa, o que diminuiu as incertezas quanto aos valores interpolados, principalmente onde não houve informações sobre os níveis de água disponíveis na bacia. Essas informações podem ser de fundamental importância para o planejamento de irrigação, fertirrigação, calendários de plantio e colheita, escolha de variedades, entre outras aplicações, em sistemas dependentes de água subterrânea, ao fornecer subsídios para a avaliação de reservas (Manzione et al., 2007) ou mesmo de riscos de contaminação das águas subterrâneas (Gomes et al., 2006).

Foram considerados como cenários extremos os valores correspondentes a 5 e 95% de probabilidade (Figura 3). O cenário a 5% de probabilidade apresenta valores que tem 95% de chance de serem superiores aos apresentados no mapa e apenas 5% de chance de serem inferiores, uma vez que se tratou de medida de posição na distribuição de probabilidade obtida (Manzione et al., 2007). Esse cenário pode ser considerado crítico para níveis muito baixos ou mesmo poços secos, e mostrou limite inferior de água disponível na bacia (Figura 3 A). Da mesma forma, o cenário a 95% de probabilidade apresentou valores com apenas 5% de chance de serem superiores aos apresentados no mapa e

95% de chance de serem inferiores (Figura 3 B). Esses cenários apresentaram informações sobre possíveis níveis mais superficiais, tendo sido possível obter, até mesmo, diagnósticos quanto a áreas com risco de alagamento.

As áreas que apresentaram níveis mais profundos em ambos os mapas foram as de cultivos de eucalipto. Nessas áreas, o desenvolvimento da floresta – já em estágio avançado em 2010, próximo do segundo corte –, além de consumir mais água, interfere na recarga subterrânea. Portanto, seria proveitoso permitir a recomposição dos níveis de água por um período, entre a colheita da madeira e um novo cultivo. Isso evitaria, por exemplo, que o novo sistema agrícola se tornasse totalmente dependente da água da chuva. Do mesmo modo, as áreas que apresentaram níveis mais superficiais foram situadas próximas às drenagens e às várzeas do ribeirão, nas quais devem ser evitadas mobilizações de capital para ocupação, pois apresentam riscos de inundação.

No caso de necessidades específicas de determinadas áreas, onde os valores extremos estimados sejam considerados impedimentos para projetos, esses valores podem ser tidos como aleatórios e com poucas chances de ocorrência. Entretanto, flutuações locais do lençol freático podem ser interpretadas, também, a partir dos valores residuais do plano de tendência regional estimado (Almeida et al., 2009). Estes resíduos podem mostrar ondulações que refletem, parcialmente, o que

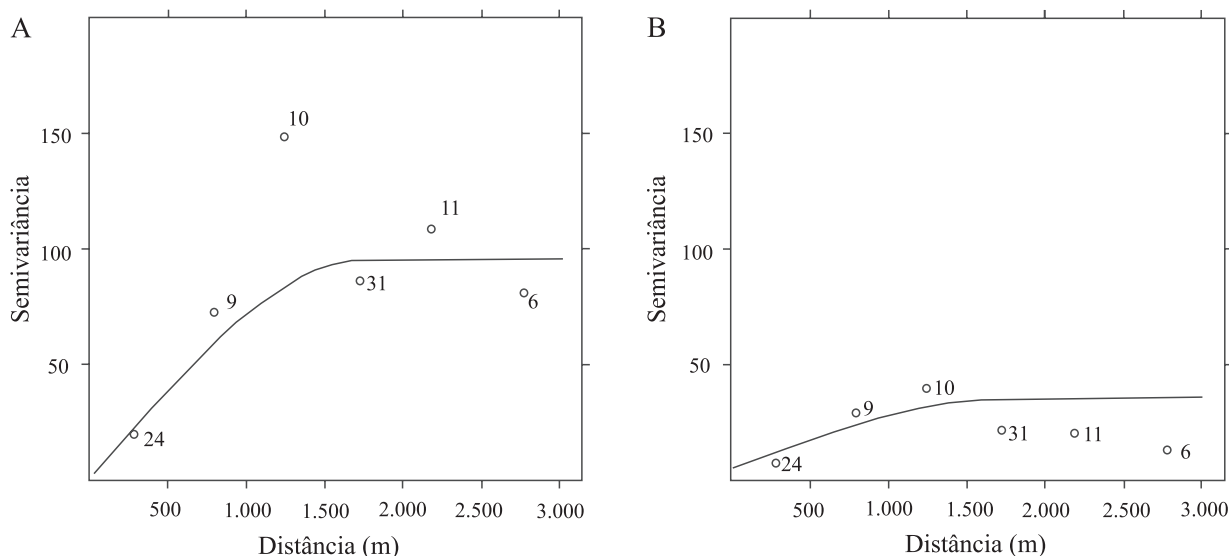


Figura 2. Semivariograma ajustado para valores simulados médios (50% de probabilidade) de alturas de lençol freático (A) e para elevação como variável auxiliar aos dados (B).

se encontra na natureza, ou seja, dependentes de um pequeno número de dados, ou mesmo de distribuição geográfica irregular, e do tipo de feição amostrada. Assim, deve-se tomar cuidado com a qualidade dos dados e com os tipos de modelo aplicados para evitar inferências errôneas.

Os resultados da validação cruzada realizada para verificar a acurácia das predições espaciais mostraram que a krigagem universal apresentou bons resultados na estimativa de alturas de nível freático, em toda área da bacia, mesmo em regiões desprovidas de informação sobre essa variável (Tabela 2). Resultados semelhantes foram observados por Rocha et al. (2007). Os erros obtidos na interpolação foram baixos quando

comparados à média dos valores simulados e aos preditos pela krigagem. Entretanto, há de se considerar que o modelo de simulação utilizou séries temporais de 30 anos, com alta variabilidade e que houve falta de informação sobre poços na parte oeste da área de estudo. Isso tornou o modelo incerto quanto à estimativa de um cenário para um curto período no futuro, embora seja altamente representativo em termos de planejamento da bacia e do uso dos recursos hídricos a longo prazo. Próximo aos poços de monitoramento, os erros foram mínimos (menores que 1 m), o que indica que os cenários foram mais confiáveis nessas regiões. Rocha et al. (2007) relataram bons resultados na representação de dados potenciométricos naturais com uso da krigagem como método de interpolação, e concluíram que o uso da geoestatística possibilita a elaboração de mapas potenciométricos confiáveis, que podem ser utilizados para diversos fins, como a visualização de áreas suscetíveis à elevação do nível freático.

Os cenários gerados podem auxiliar no planejamento do uso do solo da Bacia do Ribeirão da Onça onde se tem instalados sistemas agrícolas, como reflorestamentos com eucalipto, pomares de citros e canaviais. Por apresentar características típicas dos afloramentos

Tabela 1. Parâmetros dos semivariogramas ajustados para os valores médios de alturas de lençol freático, simuladas para 12 de outubro, com ou sem uso da elevação como variável auxiliar.

Semivariograma	Modelo	Efeito pepita (m)	Patamar (m)	Contribuição (m)	Alcance (m)
Sem variável auxiliar	Esférico	0,50	95,00	94,50	1.800,00
Com variável auxiliar	Esférico	5,00	35,00	30,00	1.800,00

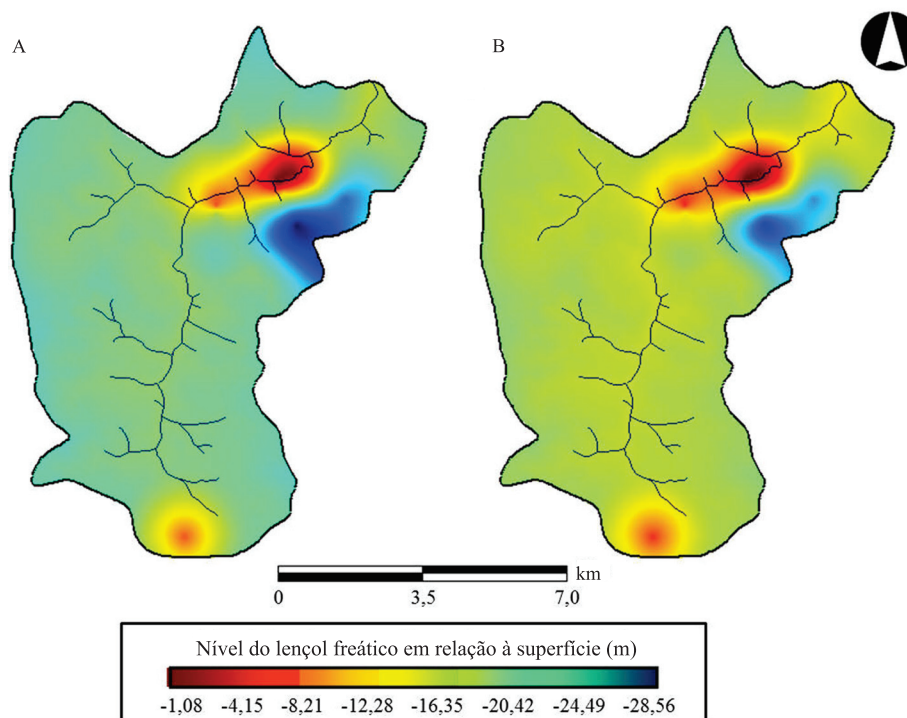


Figura 3. Cenários de possíveis alturas de lençol freático em relação à superfície na Bacia do Ribeirão da Onça, para 12 de outubro, a 5% (A) e 95% (B) de probabilidade, estimados por krigagem universal.

do arenito Botucatu, esta bacia é considerada de alta vulnerabilidade natural e de importância estratégica para a recarga de sistemas aquíferos. Assim, o uso do solo poderá alterar o ciclo hidrológico da bacia por uma ou duas décadas.

O sucesso da atividade agrícola não pode estar voltado simplesmente a mercados e tendências especulativas de curto prazo, mas deve estar embasado em um planejamento sólido do uso e da ocupação do solo. Isso envolve os impactos da atividade nos recursos naturais, a disponibilidade desses recursos para manutenção de todos os sistemas instalados na bacia e a resiliência destes às mudanças climáticas. Os cenários extremos apresentados são referenciais para esses propósitos e podem ser recalculados para outras épocas específicas do ano (Manzione et al., 2010).

Para o desenvolvimento de uma gestão ativa dos reservatórios subterrâneos, é necessário o conhecimento do perfil dos usuários, das demandas atuais e futuras, e dos aspectos técnicos referentes aos sistemas e subsistemas aquíferos, como tipos, condições de recarga, vazões médias, reservas, parâmetros dimensionais, entre outros (Campos, 2004). Por ser uma das atividades que mais consome água, a agricultura exerce grande pressão sobre a bacia hidrográfica e deve assumir papel de maior interessado

na conservação dos recursos hídricos (Gomes, 2010). Os resultados apresentados neste trabalho podem subsidiar o planejamento e o uso eficiente da água, dentro de uma proposta de racionalização da ocupação do espaço, do manejo e da gestão sustentável dos recursos hídricos na bacia.

Conclusões

1. Os cenários apresentados, na forma de mapas, permitem avaliar o comportamento dos níveis freáticos na região, para uma data selecionada, e indicam áreas com níveis muito profundos ou níveis muito superficiais.

2. A relação entre elevação e níveis freáticos permite que alturas de nível freático sejam estimadas para toda a área da bacia, de acordo com os padrões e a continuidade espacial do fenômeno em estudo.

3. Os erros encontrados na interpolação dos dados são pequenos e indicam bom desempenho da krigagem universal ao incorporar dados do modelo digital de terreno na estimativa de alturas críticas do lençol freático.

Agradecimentos

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pelo apoio financeiro.

Referências

- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Roma: FAO, 1998. 300p. (FAO. Irrigation and drainage paper, 56).
- ALMEIDA, T.I.R.; PARANHOS FILHO, A.C.; ROCHA, M.M. da.; SOUZA, G.F. de.; SÍGOLO, J.B.; BERTOLO, R.A. Estudo sobre as diferenças de altimetria do nível da água de lagoas salinas e hipossalinas no pantanal da Nhecolândia: um indicativo de funcionamento do mega sistema lacustre. **Geociências**, v.28, p.401-415, 2009.
- ASMUTH, J.R. von; BIERKENS, M.F.P.; MAAS, C. Transfer function noise modelling in continuous time using predefined impulse response functions. **Water Resources Research**, v.38, 2002. Doi: 10.1029/2001WR001136.
- ASMUTH, J.R. von; KNOTTERS, M. Characterising groundwater dynamics based on a system identification approach. **Journal of Hydrology**, v.296, p.118-34, 2004.
- ASMUTH, J.R. von; MAAS, K.; PETERSEN, J. Modeling time series of ground water head fluctuations subjected to multiple stresses. **Ground Water**, v.46, p.30-40, 2008.

Tabela 2. Validação cruzada para a interpolação por krigagem universal dos valores preditos, com 95 e com 5% de chance de ocorrência.

Cenário	Valor simulado (m)	Valor predito (m)	Desvio do valor predito (m)	Z-score ⁽¹⁾
95% de chance de ocorrência				
Valor mínimo	-29,04	-25,15	3,12	-1,41
Primeiro quartil	-19,20	-17,09	4,15	-0,24
Mediana	-13,28	-13,66	4,93	0,00
Terceiro quartil	-6,06	-8,51	7,85	0,35
Valor máximo	-0,80	-1,53	10,49	1,35
Valor médio	-13,37	-13,25	6,00	0,00
Desvio-padrão	8,93	7,01	2,50	0,62
5% de chance de ocorrência				
Valor mínimo	-25,69	-22,71	3,21	-1,18
Primeiro quartil	-17,43	-14,31	4,15	-0,37
Mediana	-10,77	-11,29	4,93	-0,02
Terceiro quartil	-5,05	-7,01	7,85	0,35
Valor máximo	-0,40	-1,21	10,49	1,31
Valor médio	-11,49	-11,41	6,00	0,00
Desvio-padrão	-8,10	-6,48	2,50	0,59

⁽¹⁾Z-score = (valor predito - valor observado) / variância da krigagem.

- BOGAERT, P.; FASBENDER, D. Bayesian data fusion in a spatial prediction context: a general formulation. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v.21, p.695-709, 2007.
- CAMPOS, J.E.G. Hidrogeologia do Distrito Federal: bases para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos. **Revista Brasileira de Geociências**, v.34, p.41-48, 2004.
- COGU, R.C.; CARABIN, G.; HALLET, V.; PETERS, V.; DASSARGUES, A. GIS-based hydrogeological databases and groundwater modelling. **Hydrogeology Journal**, v.9, p.555-569, 2001.
- COOLS, J.; MEYUS, Y.; WOLDEAMLAK, S.T.; BETELAAN, O.; DE SEMEDT, F. Large-scale GIS-based hydrogeological modeling of Flanders: a tool for groundwater management. **Environmental Geology**, v.50, p.1201-1209, 2006.
- DRUCK, S.; CARVALHO, M.S.; CÂMARA, G.; MONTEIRO, A.M.V. (Ed.). **Análise espacial de dados geográficos**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2004. 209p.
- GOMES, M.A.F. Manejo de bacias hidrográficas em áreas de afloramento do Aquífero Guarani. In: GOMES, M.A.F.; PESSOA, M.C.P.Y. (Ed.). **Planejamento ambiental do espaço rural com ênfase para microbacias hidrográficas: manejo de recursos hídricos, ferramentas computacionais e educação ambiental**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2010. p.275-319.
- GOMES, M.A.F.; FILIZOLA, H.F.; SPADOTTO, C.A. Classificação das áreas de recarga do Sistema Aquífero Guarani no Brasil em domínios pedomorfoagroclicmáticos – subsídio aos estudos de avaliação do risco de contaminação das águas subterrâneas. **Revista do Departamento de Geografia**, v.18, p.67-74, 2006.
- GOOVAERTS, P.; KERRY, R. Using ancillary information data to improve precision of soil and crop attributes in precision agriculture. In: OLIVER, M.A. (Ed). **Geostatistical applications for precision agriculture**. Nova York: Springer, 2010. p.167-194.
- HENGL, T.; HEUVELINK, G.B.M.; ROSSITER, D.G. About regression-kriging: from equations to case studies. **Computers and Geosciences**, v.33, p.1301-1315, 2007.
- HENGL, T.; HEUVELINK, G.B.M.; STEIN, A. A generic framework for spatial prediction of soil variables based on regression-kriging. **Geoderma**, v.120, p.75-93, 2004.
- JHA, M.K.; CHOWDHURY, A.; CHOWDARY, V.M.; PEIFFER, S. Groundwater management and development by integrated remote sensing and geographic information systems: prospects and constraints. **Water Resources Management**, v.21, p.427-467, 2007.
- KNOTTERS, M.; BIERKENS, M.F.P. Predicting water Table depths in space and time using a regionalised time series model. **Geoderma**, v.103, p.51-77, 2001.
- KWR WATERWARE. **Menyanthes**. Available at: <<http://www.menyanthes.nl/>>. Accessed on: 4 Oct. 2012.
- MANZIONE, R.L.; DRUCK, S.; CÂMARA, G.; MONTEIRO, A.M.V. Modelagem de incertezas na análise espaço-temporal dos níveis freáticos em uma bacia hidrográfica. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.42, p.25-34, 2007.
- MANZIONE, R.L.; KNOTTERS, M.; HEUVELINK, G.B.M.; VON ASMUTH, J.R.; CAMARA, G. Transfer function-noise modeling and spatial interpolation to evaluate the risk of extreme (shallow) water-table levels in the Brazilian Cerrados. **Hydrogeology Journal**, v.18, p.1927-1938, 2010.
- NOURANI, V.; EIJALI, R.G.; ALAMI, M.T. Spatiotemporal groundwater level forecasting in coastal aquifers by hybrid neural network-geostatistics model: a case study. **Environmental Engineering Science**, v.28, p.217-228, 2011.
- ODEH, I.O.A.; MCBRATNEY, A.; CHITTLEBOROUGH, D.J. Spatial prediction of soil properties from landform attributes derived from a digital elevation model. **Geoderma**, v.63, p.197-214, 1994.
- OLIVER, M.A. **Geostatistical applications for precision agriculture**. Dordrecht: Springer, 2010. 331p.
- PEBESMA, E.J. Multivariable geostatistics in S: the gstat package. **Computers and Geosciences**, v.30, p.683-691, 2004.
- PEBESMA, E.J. The role of external variables and GIS databases in geostatistical analysis. **Transactions in GIS**, v.10, p.615-632, 2006.
- PEETERS, L.; FASBENDER, D.; BATELAAN, O.; DASSARGUES, A. Bayesian data fusion for water Table interpolation: incorporating a hydrogeological conceptual model in kriging. **Water Resources Research**, v.46, 2010. Doi: 10.1029/2009WR008353.
- R DEVELOPMENT CORE TEAM. **The R Project for Statistical Computing**. Available at: <<http://www.r-project.org/>>. Accessed on: 4 Oct. 2012.
- RENARD, P. Stochastic hydrogeology: what professionals really need? **Ground Water**, v.45, p.531-541, 2007.
- ROCHA, M.M. da; LOURENCO, D.A.; LEITE, C.B.B. Aplicação de krigagem com correção do efeito de suavização em dados de potenciometria da cidade de Pereira Barreto – SP. **Geologia USP. Série Científica**, v.7, p.37-48, 2007.
- TANKERSLEY, C.D.; GRAHAM, W.D. Development of an optimal control system for maintaining minimum groundwater levels. **Water Resources Research**, v.30, p.3171-3181, 1994.
- 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, p.65-80, 1997.
- WACKERNAGEL, H. **Multivariate geostatistics: an introduction with applications**. Berlin: Springer, 2003. 387p.
- WENDLAND, E.; BARRETO, C.E.A.G.; GOMES, L.H. Water balance in the Guarani Aquifer outcrop zone based on hydrogeologic monitoring. **Journal of Hydrology**, v.342, p.261-269, 2007.
- YI, M.; LEE, K. Transfer function-noise modelling of irregularly observed groundwater heads using precipitation data. **Journal of Hydrology**, v.288, p.272-287, 2004.
- 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.