

Análise de tendências nos níveis freáticos de uma bacia hidrográfica em área de recarga do Sistema Aquífero Guarani (SAG) auxiliado por imagens de sensoriamento remoto

Rodrigo Lilla Manzione¹
Diego Hiroshi Tanikawa¹
Edson Cezar Wendland²

¹ Universidade Estadual Paulista – UNESP/SP
Av. Vitalina Marcusso, 1500 - 19910-206 - Ourinhos – SP, Brasil
manzione@ourinhos.unesp.br; tanikawa@hotmail.com

² Universidade de São Paulo - USP/EESC
Av. Trabalhador São-carlense, 400 - Caixa Postal 359 - 13560-9700 - São Carlos - SP, Brasil
ew@sc.usp.br

Abstract. Monitoring water table depths is an important strategy in groundwater planning and management. In areas affected by seasonality, where the groundwater levels fluctuated largely, observed water table depths observations are valuable information about the aquifer dynamics in a watershed with different land uses and different water demands. Although, ancillary information derived from satellite images and/or digital elevation models e.g. can help the interpretation of modeling results and improve hydrological estimations. The aim of this work was investigate trends in water table depth due different land uses in the Ribeirão da Onça watershed, Brotas/SP, Brazil. This watershed is located in a recharge area of the Guarani Aquifer System (GAS) and the water levels are monitored in a semi-monthly frequency at 20 wells since 2004. Landsat images from 2003, 2005, 2008 and 2010 were classified for the different land uses in the watershed and use to explain possible trend in the time series. The results did not denote any significant trend in the period investigates. However, in some periods, the land use influences the water levels in some wells by crop and plants development and the stage of the productive cycle. Monitoring strategies should be continues to sustain land use planning and garantie water availability for agro-ecological purposes.

Palavras-chave: water table depths, time series modelling, land use, alturas de lençol freático, modelagem de séries temporais, uso do solo.

1. Introdução

O monitoramento de níveis freáticos fornece importantes informações para a gestão das águas subterrâneas. Em áreas afetadas pela sazonalidade, as reservas renováveis do aquífero podem variar muito entre as estações, principalmente em função da recarga direta controlada pela precipitação pluvial. Prever a resposta de um aquífero (em termos de quantidade e qualidade) quanto às atividades de exploração propostas e em tempo hábil para gerar políticas racionais de exploração em determinada região é uma questão complicada, devido à complexidade dos processos envolvidos (Manoel Filho, 2000), fazendo com que muitas vezes a gestão de águas subterrâneas não seja incluída no planejamento e gestão de recursos hídricos.

O Sistema Aquífero Guarani (SAG) constitui uma importante reserva mundial de água subterrânea. Só no Brasil, estima-se que 1.443 municípios se localizam na área do SAG (Borghetti et al., 2004), constituindo uma área de grande importância econômica e apresentando diversos usos como urbano, industrial e rural. Em áreas dependentes das reservas de água subterrânea, os níveis de reserva hídrica podem se tornar críticos. Assim, existe a necessidade de que sejam feitas previsões seguras a respeito das oscilações dos níveis freáticos, que auxiliem no suporte a tomada de decisão no planejamento dos recursos hídricos. Um melhor conhecimento dos processos que ocorrem no sistema solo-planta-água-atmosfera visa o planejamento e o uso eficiente da água, além da redução dos impactos antrópicos negativos no uso da água. A caracterização dos recursos hídricos subterrâneos é importante para estimar o risco associado à níveis d'água extremos, monitorar o comportamento desses

níveis em função do uso do solo, intervenções antrópicas e mudanças climáticas, e para desenvolver estratégias na gestão das águas. Para subsidiar a gestão das reservas subterrâneas em áreas de afloramento é necessário monitorar os recursos hídricos, modelar os processos hidrológicos e simular os efeitos de políticas públicas, como extração e bombeamento. Também se fazem importantes informações sobre as bases físicas dos fenômenos em questão, mas a incerteza sobre as predições de modelos devem ser consideradas.

O objetivo desse trabalho foi utilizar imagens multitemporais de satélite para confecção de mapas de uso e ocupação do solo em uma bacia hidrográfica em área de recarga do Sistema Aquífero Guarani (SAG) para que esses auxiliassem na interpretação de dados relativos a modelos que analisam tendências nos níveis freáticos.

2. Materiais e métodos

2.1 Área de estudo

A Bacia do Ribeirão da Onça corresponde a uma área de aproximadamente 6.500 ha, localizada no município de Brotas entre as coordenadas 22° 10'S 47° 55'O e 22° 15'S 48° 00'O, região centro-leste do Estado de São Paulo (Figura 1). Em seu exutório conecta-se ao Rio Jacaré-Guaçu, afluente do Tietê pela margem direita.

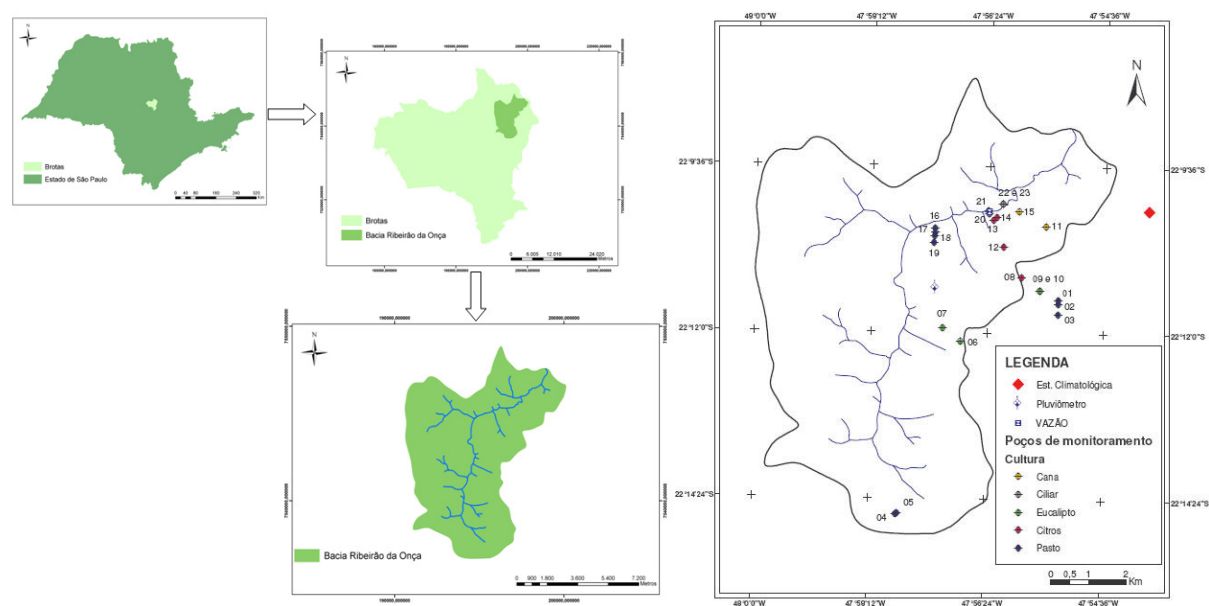


Figura 1 – Localização da Bacia do Ribeirão da Onça, Brotas-SP e distribuição dos poços.

Geologicamente grande parte da bacia está sobre a Formação Botucatu (arenitos), enquanto que no exutório muda-se para um Complexo Botucatu-Diabásio (com *sills* de diabásio), ambas pertencentes ao Grupo São Bento, datado do Mesozóico (Barreto, 2006). Com essa geologia, percebe-se que a bacia corresponde à uma área de recarga do Sistema Aquífero Guarani (SAG), ilustrada pela presença das Formações Botucatu e Pirambóia que permitem a infiltração de parte da água precipitada da chuva. Em relação às características climatológicas, baseando-se na classificação de Köppen, o clima da área é definido como Subtropical Úmido (Cwa), com presença de chuvas de verão, variando para Tropical Úmido com inverno seco. Além de a precipitação média anual está entre 1300 mm e 1400 mm (Barreto, 2006).

2.2 Modelagem das séries temporais de alturas de lençol freático

Os níveis freáticos são observados em 20 poços distribuídos ao longo da bacia com uma frequência quinzenal. Os poços estão localizados em regiões de diferentes ocupações do solo na bacia (eucalipto, cana, pastagens e citros), permitindo observar as variações dos níveis freáticos sob diferentes exigências hídricas. O monitoramento dos níveis freáticos teve início em 2004 compondo uma série histórica contínua até 2009. A uma distância de 1,5 km encontra-se a Estação Climatológica do Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada (CRHEA) da Universidade de São Paulo (USP) onde são registradas séries de precipitação e obtidos os dados climatológicos para a estimativa da evapotranspiração, utilizadas como variáveis explicativas no modelo de oscilação dos níveis freáticos. Os dados climáticos disponíveis na Estação Climatológica formam uma série temporal com início em 1974. As séries foram utilizadas a partir do início do monitoramento, em 02/03/2004.

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 de função de transferência de ruído 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 níveis freáticos é uma transformação de uma série de precipitação excedente, descontando a evapotranspiração potencial. Essa transformação é completamente governada pela função de impulso e resposta. Detalhes da aplicação dessa metodologia aos dados de monitoramento dessa bacia podem ser encontrados em Manzione et al. (2009a), Manzione et al. (2009b) e Manzione et al. (2010).

No caso da análise de tendências lineares, um parâmetro adicional é adicionado ao modelo PIRFICT e sua significância é testada (Manzione et al., 2006)

2.3 Classificação das imagens de satélite

Para classificação multitemporal das imagens de satélite foram selecionadas cinco cenas Landsat dos anos de 2003, 2005, 2008 e 2010, que foram registradas e armazenadas em banco de dados no SIG SPRING. Posteriormente, aplicou-se o Modelo Linear de Mistura Espectral (Shimabukuro e Smith, 1991) sobre as imagens, gerando imagens fração solo, vegetação e sombra a partir da resposta espectral do pixel nas diversas bandas. Após a geração das imagens-fração, procedeu-se à segmentação das mesmas, agrupando os pixels adjacentes e com características similares, formando uma cena dividida em polígonos. Sobre as imagens segmentadas procedeu-se à classificação não-supervisionada, através do classificador Isoseg, com limiar de aceitação igual a 75%. Como produto final obtiveram-se imagens temáticas, posteriormente transformada em mapas de uso e ocupação do solo, divididos em classes, representando os alvos presentes na cena: cana-de-açúcar, pastagens, soja, citros, mata nativa e eucalipto. Detalhes da classificação das imagens podem ser obtidos em Tanikawa e Manzione (2010). Modelos que envolvem dados difíceis de obter ou caros de serem medidos podem ter informação espacial agregada a partir de produto de sensoriamento remoto de forma que permitam uma melhor estimativa dos parâmetros desejados (Manzione et al. 2007).

3. Resultados e discussões

A Tabela 1 mostra o uso do solo para cada um dos poços de observação para as cenas dos anos 2003, 2005, 2008 e 2010 e os parâmetros de tendência linear ajustados a cada uma das séries de alturas do lençol freático. A Figura 2 traz a classificação das imagens quanto ao uso e ocupação do solo para os anos 2003, 2005, 2008 e 2010.

Tabela 1 – Uso dos solo para cada um dos poços de observação para as cenas dos anos 2003, 2005, 2008 e 2010 e os parâmetros de tendência linear ajustados a cada uma das séries de alturas do lençol freático.

POÇO	2003	2005	2008	2010	PTL	Desv Pad	Sig
2	E	E	Se	E	3,95	0,51	NS
3	E	E	Se	E	0,38	0,07	NS
4	P	P	P	P	0,40	0,21	S
5	P	P	P	P	-0,22	0,17	S
8	Ct/E	E/Ct	Se	Cn	7,52	0,52	NS
9	E	E	Se	E	4,65	0,70	NS
10	E	E	Se	E	4,48	0,49	NS
11	Cn	Se	Se	Cn	-0,34	0,36	S
12	Ct	Ct	Se	Ct	0,09	0,42	S
13	Ct	Ct	Ct	Ct	0,10	0,19	S
14	Ct	Ct	Ct	Ct	0,17	0,18	S
15	Se	Se	Ct	Cn	0,44	0,26	S
16	P	P	P	P	0,56	0,13	NS
17	P	P	P	P	1,11	0,25	NS
18	P	P	P	P	1,61	0,39	NS
19	P	P	P	P	1,77	0,40	NS
20	Se	Ct	Ct	Se	0,38	0,10	NS
21	Cr	Cr	Cr	Cr	0,09	0,17	S
22	Ct	Ct	Ct	Ct	-0,18	0,06	NS
23	Ct	Ct	Ct	Ct	-0,07	0,03	NS

LTP: Parâmetro de tendência linear; Desv Pad: Desvio padrão; E: Eucalipto; Se: Solo exposto; P: Pasto; Ct: Citros; Cn: Cana-de-açúcar; Cr: Cerrado; Sig; Significância; NS: não-significativo; S: significativo.

Os parâmetros de tendência linear foram analisados quanto a sua significância segundo seus desvios em relação a média. Os resultados dos parâmetros de tendência linear ajustados aos modelos de séries temporais demonstram-se não significativos (NS) para a maioria dos poços, mostrando que não houveram alterações significativas detectadas por essa técnica. Para os poços 11, 12, 13, 14 e 15 os parâmetros mostraram-se significativos (S), sendo que todos esses poços se encontram localizados próximos uns dos outros na bacia. Somente o poço 11 mostrou uma pequena queda, entretanto encontrou-se sob renovação nos últimos anos, enquanto os outros poços que se encontram em área fertirrigada de citros apresentaram uma pequena elevação dos níveis. É interessante notar uma tendência nos poços 4 (positiva/elevação) e 5 (negativa/queda) que se encontram 10 metros distantes um do outro, mas em substratos geológicos diferentes. O poço 4 é mais profundo (160 metros) e está na formação Pirâmóbia do SAG. Já o poço 5 é mais superficial (50 metros) e se localiza na formação Botucatu do SAG. O poço 5 apresentou queda nos níveis enquanto o 4 uma pequena elevação, embora em ambos os casos o uso do solo se manteve o mesmo. O poço 21 que se localiza em área de Cerrado próximo ao rio apresentou uma pequena elevação de menos de 10 cm. Nos poços onde foram detectadas tendências significativas de rebaixamento ou elevação, os valores não são considerados relevantes uma vez que não passam de 40 cm.

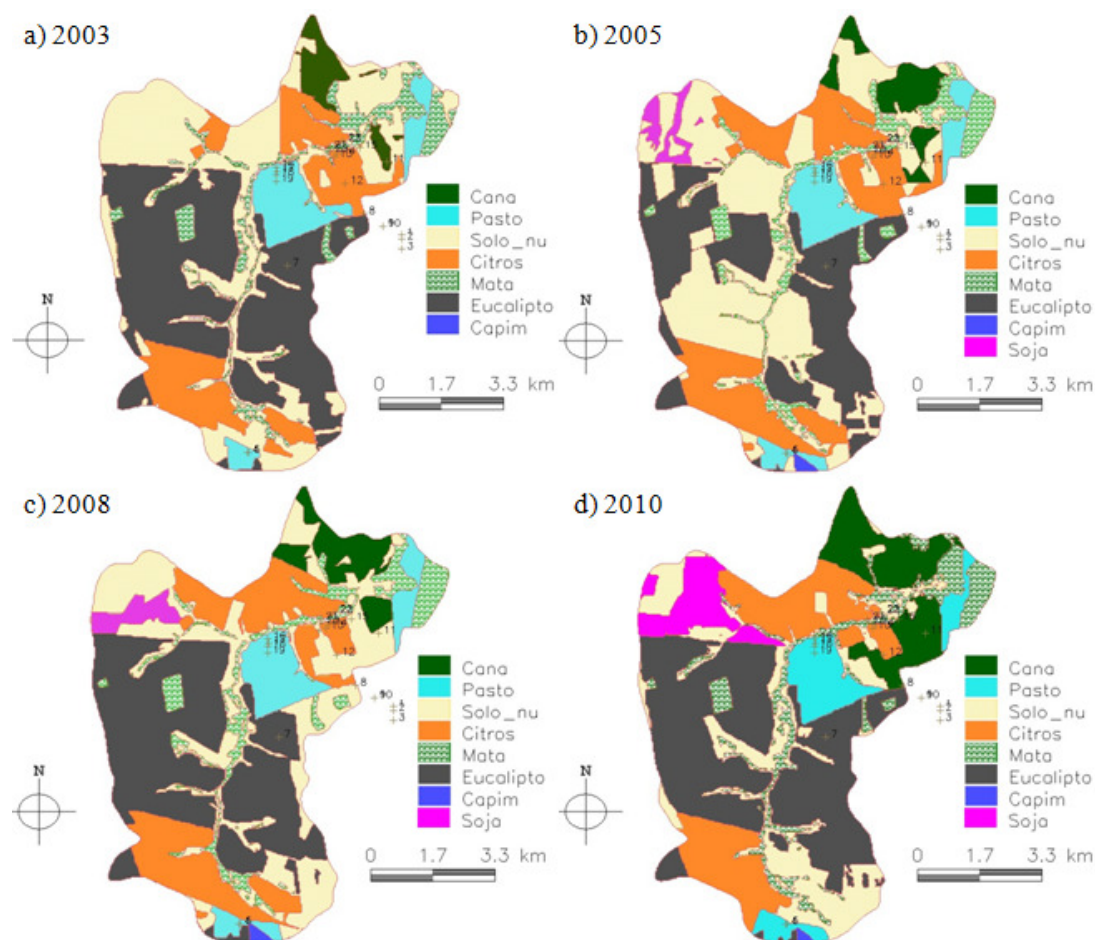


Figura 2 – Mapas de uso e ocupação do solo na Bacia do Ribeirão da Onça para os anos de 2003 (a), 2005 (b), 2008 (c) e 2010 (d) gerados a partir da classificação das imagens Landsat.

A metodologia permite ainda que períodos específicos determinados dentro da série de monitoramento possam ser isolados de forma a verificar efeitos isolados de determinados usos do solo nos níveis freáticos. A medida que mais dados são registrados e adicionados a série histórica, a confiabilidade das análises aumenta, e mais detalhes quanto ao uso do solo podem ser incorporados a partir de produtos de sensoriamento remoto. A dinâmica do uso do solo também deve ser monitorada de acordo com as atividades agrícolas presentes na bacia, necessitando de mais cenas quando se tratarem de culturas anuais, e podendo aumentar espaço entre cenas quando se tratarem de cultivos perenes e/ou de ciclo mais longo.

4. Conclusões

Com base nos resultados apresentados podemos concluir que:

- Para a maioria dos poços não foram detectadas tendências significativas nos níveis freáticos da Bacia do Ribeirão da Onça durante o período analisado;
- Nos poços onde foram detectadas tendências significativas de rebaixamento ou elevação, os valores não foram considerados relevantes pois não passaram de 40 cm;
- A classificação multitemporal de imagens de satélite relativas a área de estudo forneceram informações na escala de detalhe necessária para detectar as mudanças no uso e ocupação do solo no período analisada;
- Recomenda-se continuar o monitoramento dos níveis freáticos na bacia a fim de subsidiar o planejamento do uso do solo em função da utilização dos recursos hídricos.

Agradecimentos

À FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) pelo auxílio financeiro na execução desse projeto (Processo # 2009/05204-8) e a bolsa de treinamento técnico (TT-1) concedida (Processo # 2009/11581-9).

Referências bibliográficas

Barreto, C. E. A. G. **Balanço hídrico em zona de afloramento do Sistema Aquífero Guarani a partir de monitoramento hidrogeológico em bacia representativa**. 2006. 270 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade de São Paulo, São Carlos. 2006.

Borghetti, N. R. B. et al. **Aquífero Guarani, a verdadeira integração dos países do Mercosul**. Curitiba: Imprensa Oficial, 2004. 214 p.

Câmara, G. et al. SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modeling. **Computers & Graphics**, v. 20, p. 395-403, 1996.

Manoel Filho, J. Água subterrânea: história e importância. In: Feitosa, F.A.C.; Manoel Filho, J. (Org) **Hidrogeologia: Conceitos e aplicações**. Fortaleza; CPRM/REFO-UFPE, 2000. p. 3-12.

Manziona, R. L. et al. Mapping trends in water table depths in a Brazilian cerrado area. In: Caetano, M.; Painho, M. (Eds.) **Proceedings of Accuracy 2006: 7th International Symposium on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Sciences**. Lisboa: Instituto Geográfico Português, 2006. p. 449-458. Disponível em: <<http://www.spatial-accuracy.org/2006/PDF/Manziona2006accuracy.pdf>>. Acesso em: 15 nov. 2010.

Manziona, R. L. et al. Incorporation of ancillary information derived from satellite images applied on environmental variables evaluation. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 13, 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007. p. 3437-3444. Disponível em: <<http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr%4080/2006/11.14.22.15/doc/3437-3444.pdf>>. Acesso em: 15 nov. 2010.

Manziona, R. L. Regionalized spatio-temporal modeling of water table depths in the Brazilian Cerrado. 2007. 141p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos. 2007.

Manziona, 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, 2009a. v. 1. p. 40-40.

Manziona, R. L.; Marcuzzo, F. F. N.; Wendland, E. C. Funções de impulso e resposta aplicadas à modelagem de níveis freáticos em área de recarga do Sistema Aquífero Guarani. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 18, 2009, Campo Grande. **O desafio da prática da sustentabilidade na gestão dos recursos hídricos: Natureza, gente e desenvolvimento**. Campo Grande: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2009b. v. 1. p. 1-12.

Manziona, R. L.; Marcuzzo, F. F. N.; Wendland, E. C. Modelagem de níveis freáticos em área de recarga do Sistema Aquífero Guarani sob diferentes usos do solo. In: Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 16, 2010, São Luis. **Águas Subterrâneas: Patrimônio Natural da Humanidade**. São Paulo: Associação Brasileira de Águas Subterrâneas, 2010a. v. 1. p. 1-14.

Tanikawa, D. H.; Manziona, R. L. Análise temporal do uso e ocupação do solo em uma bacia hidrográfica em área de recarga do aquífero Guarani. In: Congresso Brasileiro de Geoprocessamento, 2, 2010, Aracajú. **Anais...** Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Cartografia, 2010. p. 724-729. CD-ROM

Von Asmuth, J. R.; Bierkens, M. F. P.; Maas, C. Transfer function noise modeling in continuous time using predefined impulse response functions. **Water Resources Research**, v. 38 (12), p. 23.1-23.12, 2002.