Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>

Modelo híbrido de oscilação de níveis freáticos a partir de diferentes variáveis ambientais

Rodrigo Lilla Manzione¹, Aira Nava², Maria Márcia Pereira Sartori³

¹Professor Associado. UNESP (Universidade Estadual Júlio de Mesquita Filho) - FCE (Faculdade de Ciências e Engenharia) - Campus de Tupã. Departamento de Engenharia de Biosistemas. Rua Domingos da Costa Lopes, 780, CEP 17602-496, Tupã, São Paulo. (14) 3404-4200. lilla.manzione@unesp.br (autor correspondente). ²Geógrafa. Mestra em Agronomia. UNESP (Universidade Estadual Júlio de Mesquita Filho) - FCA (Faculdade de Ciências Agrônomicas) - Campus de Botucatu. Curso de Pós-Graduação em Agronomia (Irrigação e Drenagem). Av. Universitária, 3780, CEP 18610-034, Botucatu, São Paulo. (14) 3880-7165. aira.nv@gmail.com. ³Pesquisadora nível III. UNESP (Universidade Estadual Júlio de Mesquita Filho) - FCA (Faculdade de Ciências Agrônomicas) - Campus de Botucatu. Departamento de Produção e Melhoramento Vegetal. Av. Universitária, 3780, CEP 18610-034, Botucatu, São Paulo. (14) 3880-7161. maria.mp.sartori@unesp.br.

Artigo recebido em 01/04/2020 e aceito em 21/05/2020

RESUMO

Os sistemas de águas subterrâneas são complexos e heterogêneos. Seus níveis são afetados por uma combinação de fatores naturais e antropogênicos. Esses fatores somados às características naturais inerentes (como permeabilidade, porosidade e granulometria) representam desafios para a modelagem hidrológica. O presente trabalho teve como objetivo verificar a influência de variáveis físico-hídricas e de manejo do solo, topografia e vegetação nas oscilações dos níveis das águas subterrâneas do Sistema Aquífero Bauri (SAB). Dados relacionados a esses aspectos totalizaram 21 possíveis variáveis preditivas dos níveis freáticos. As informações foram coletadas nas bacias hidrográficas da Estação Ecológica de Santa Bárbara/SP. A seleção das variáveis de maior relevância para o ajuste do modelo de regressão linear foi realizada por meio da análise de componentes principais, que determinou aquelas com maior variabilidade. Os resultados mostraram um ajuste robusto aos dados pelo modelo multivariado e uma boa capacidade preditiva para novas observações. Essas informações podem auxiliar a tomada de decisão quanto ao uso da água e dar suporte aos instrumentos de gestão de recursos hídricos como ferramentas para o planejamento dos recursos hídricos.

Palavras-chave: águas subterrâneas; modelagem; regressão linear múltipla, análise de componentes principais.

Phreatic levels hybrid model from different environmental variables

ABSTRACT

Groundwater systems are complex and heterogeneous. The levels are affected by a combination of natural and anthropogenic factors. These factors, added to the inherent natural characteristics (such as permeability, porosity and grain size) represent challenges for hydrological modeling. This study aimed to verify the influence of soil physical-hydric and management, topography and vegetation variables on the Bauri Aquifer System (SAB) groundwater levels oscillations. These aspects summed up to 21 possible predictive variables of groundwater levels. Information were collected at the watersheds of the Santa Barbara Ecological Station/SP-Brazil. The most relevant variables for the multiple regression model were chosen using principal components analysis, which determined those variables with greater variability. The results indicated a robust fit to the data by the model and good predictive capacity for new observations. This information can help decision-making on water use and support water resource management instruments, as tools for water resource planning.

Keywords: groundwater; modelling; multiple linear regression; principal component analysis.

Introdução

A relação existente entre os corpos hídricos superficiais e as águas subterrâneas é de fundamental importância no entendimento do ciclo hidrológico, já que mudanças na disponibilidade de recursos hídricos podem apresentar impactos no meio ambiente. Em grande parte do território brasileiro, o fluxo de base proveniente dos aquíferos alimenta os rios e os mantém perenes nos períodos secos (ANA, 2018). Os estudos em hidrologia se tornam cada vez mais importantes, à medida que há o aumento da demanda sobre um estoque de água limitado. Uma das principais ameaças ao planejamento do uso dos recursos hídricos é o cenário de incertezas climáticas que dificultam a aplicação dos modelos pré-existentes e em uso (Kløve et al., 2014, Gharbia et al., 2018). Para proteger os recursos e, ao mesmo tempo, atender a essa necessidade crescente, deve-se saber onde encontrar água, além de saber como seus estoques se renovam. Por meio deste conhecimento, é possível dispor do recurso sem comprometer o abastecimento futuro (Coleridge, 2006). No tocante às águas subterrâneas, as incertezas associadas às suas interfaces com diferentes componentes do ciclo hidrológico têm efeitos inerentes desde a superfície relativas às plantas (Alaghmand et al., 2014, Antunes et al., 2018), corpos hídricos superficiais (Pöschke et al., 2018), relevo (Millar et al., 2018), passando pela hidrologia da zona vadosa (Kong et al., 2015), além de padrões de variabilidade temporal (Yu et al., 2016) e espacial (Crosbie et al., 2018), tanto em escala local (Han et al., 2018) quanto continental (Condon e Maxwell, 2015). Existe uma necessidade crescente de novos modelos explicativos e/ou uma atualização constante dos modelos existentes para atender esses cenários que se apresentam.

Para entender estas relações, é necessário caracterizar a resposta dos aquíferos em função das variáveis climáticas que influenciam o sistema, das características hidrogeológicas locais e do uso e ocupação da terra (Von Asmuth e Knotters, 2004; Manzione, 2015). O monitoramento das águas subterrâneas fornece dados importantes ao planejamento dos recursos hídricos, possibilitando indicações a respeito de mudanças que estejam ocorrendo como consequência de práticas de manejo. A modelagem dos recursos hídricos subterrâneos apresenta-se como uma ferramenta capaz de explicar a complexidade de fatores naturais e antropogênicos que governam e

interferem nas movimentações e nos estoques das águas subterrâneas (Kresic e Mikszewski, 2012).

Nesse sentido, a gestão dos recursos hídricos é essencial, uma vez que se caracteriza como o conjunto de ações a fim de regular o uso, o controle e a proteção desses recursos em conformidade com a legislação e normas pertinentes (IBGE, 2013). A Política Nacional de Recursos Hídricos conceitua a importância da gestão sistemática dos recursos hídricos sem a dissociação dos aspectos de quantidade e de qualidade, conforme o enunciado do Art. 3º, Cap. III, Tit. I, Lei nº 9.433 (Brasil, 1997). Para Hirata et al. (2010), a gestão da água subterrânea no país ainda precisa avançar e a falta de políticas públicas para o setor reflete uma lacuna de conhecimento do estágio de utilização e das potencialidades dos aquíferos. Para os autores, os desafios enfrentados para a gestão envolvem a regulamentação do uso da água subterrânea, a avaliação dos riscos aos quais estão submetidas e a determinação de bases técnicas que viabilizam aproveitar, de forma integrada e sinérgica, os recursos hídricos superficiais e subterrâneos. Dessa forma, uma gestão integrada das águas subterrâneas é necessária, pois se configura como um processo estruturado que promove o manejo coordenado com os demais recursos e que considera as relações políticas envolvidas, visando alcançar o equilíbrio econômico, social e ambiental (Figura 1) a longo prazo (Jakeman et al., 2016).

Para que as informações reunidas pelas redes de monitoramento de águas subterrâneas sejam plenamente utilizadas, é preciso testar metodologias que acessem a variabilidade de dados de maneira conjunta, o que continua sendo um desafio (Von Asmuth e Knotters, 2004). Modelos matemáticos e estatísticos têm sido aplicados à descrição de fenômenos naturais por se tratarem de abstrações da realidade encontrada, uma tentativa de representação de uma ou todas as propriedades de um fenômeno, sistema ou objeto, que tem com propósito compreender melhor a resposta de processos a partir de observações realizadas, ou mesmo deduzir efeitos (Tucci, 2005). Sua construção é uma tentativa de ganho em conhecimento sobre determinado fenômeno. À medida que o conhecimento sobre um processo se expande, a complexidade dos modelos tende a aumentar. A utilização de modelos é útil para realização de prognósticos e projeções futuras de determinadas situações, através do uso de simulações por exemplo (Manzione, 2014). O gerenciamento de aquíferos deve usar, da melhor

forma possível, as informações disponíveis e modelos são utilizados mundo afora como ferramentas de assimilação de dados dos sistemas aquíferos para guiar as decisões e estratégias de gestão da qualidade e da quantidade das águas subterrâneas (Mathias e Wheeler, 2010). É essencial que se tenha um entendimento minucioso de processos complexos que envolvem as águas subterrâneas quanto à avaliação e gerenciamento de atividades (Ahmed et al., 2010).

Os modelos podem ser uma ferramenta interessante na prática da gestão de recursos hídricos, gerando informações sobre a situação

atual de uma bacia hidrográfica, projetando a condição que desejamos para a bacia, e também verificando a possibilidade de se chegar a essa condição. Diversos autores procuram entender processos hidrológicos através de diferentes variáveis explicativas, e nesse sentido os métodos de regressão e suas variantes se destacam como ferramentas estatísticas passíveis de fornecer tais respostas (Manziona et al., 2014; Seeboonruang, 2015; Wang et al., 2018; Yan et al., 2018; Kock et al., 2019).

Figura 1. Questões associadas às águas subterrâneas e os setores políticos relacionados.

Fonte: Jakeman et al. (2016).

Modificado pelos autores.

Tendo sido colocados os desafios da gestão de recurso hídricos no uso de informações mais precisas baseadas nas diversas componentes do ciclo hidrológico e as vantagens e possibilidades do uso de modelos na gestão de recursos hídricos, mais especificamente os recursos hídricos subterrâneos, esse estudo procurou utilizar um banco de dados amostrais coletados a campo e por sensores remotos para construção de um modelo capaz de prever níveis freáticos em regiões com

escassez de dados de monitoramento, sob a hipótese que esses dados seriam suficientes para explicar as influências na oscilação do aquífero. Assim, esse trabalho teve como objetivo compreender o comportamento das águas subterrâneas monitoradas em uma Área de Proteção Ambiental, sob diferentes influências físicas, criando um modelo explicativo para resposta dos níveis freáticos do Sistema Aquífero Bauru (SAB), importante manancial da porção centro-oeste do Estado de São Paulo, e discutindo

seus resultados sob a ótica da gestão de recursos hídricos.

Materiais e métodos

Área de estudo

A área de estudo (Figura 2) encontra-se inserida na Estação Ecológica de Santa Bárbara (EEcSB) e na Floresta Estadual de Santa Bárbara (FESB), localizada à Rodovia SP 261 – km 58, coordenadas 22°48'59" Sul e 49°14'12" Oeste, no município de Águas de Santa Bárbara/SP. A unidade de conservação foi regulamentada pelo Decreto 22.337 de 07 de junho de 1984 que instituiu sua formação com uma área de 4.371 hectares dentro dos limites da Floresta Estadual de

Santa Bárbara, dos quais apresentam uma área 2.712 hectares de vegetação nativa (Cerrado, brejos e mata de galeria) dividindo o espaço com o reflorestamento com pinus e eucalipto. Segundo Rosa (2006), a criação da Floresta Estadual foi incentivada pela combinação de acontecimentos a partir da década de 1960, como o Código Florestal de 1965, incentivos fiscais para práticas de reflorestamento em 1966, a Constituição Federal de 1967 e a criação do Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Florestal (IBDF). No mesmo período, o governo do Estado de São Paulo realizou desapropriação de terras para criação da Floresta Estadual de Santa Bárbara pelo decreto nº 44.305 de 30 de dezembro de 1964.

Figura 2. Localização da EEcSB e da FESB no município de Águas de Santa Bárbara/SP.

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

de 18°C, com máximas em janeiro, entre 22°C e 30°C, e mínimas no mês mais frio 18°C (Melo e Durigan, 2011).

O local é delimitado a leste pelo Rio Capão Rico e a oeste pelo Rio Capivari, ambos com as nascentes em propriedades particulares a montante. Em seu interior, é possível encontrar nascentes de muitos corpos hídricos, o que assegura sua função de proteção às águas superficiais (Honda e Nizoli,

2005). Inúmeros corpos de água nascem no interior dessa unidade de conservação, muitos dos quais secam durante o período de estiagem. Toda a área faz parte da unidade hidrográfica do Rio Pardo, integrante da bacia hidrográfica do Rio Paranapanema (UGRHI-17).

A Figura 3 apresenta as bacias dos Rios Capivari e Capão Rico e as bacias dos rios nos quais estão localizados os pontos de coleta de informações de águas subterrâneas e de solo, sendo eles os Ribeirões do Guarantã, Santana, Boi, Bugre e Passarinho.

Figura 3. Área de estudos com a rede de drenagem da EEcSB e FESB.

As unidades de conservação se encontram em uma zona de contato entre os biomas do Cerrado (savana) e da Mata Atlântica (floresta tropical), ambos incluídos entre os *hotspots* globais para a conservação. Isso garante ao local grande importância, uma vez que áreas ecotonais são reconhecidas por sua maior diversidade e por sua relevância na dinâmica de grandes tipos vegetacionais em períodos de mudanças climáticas (Durigan e Ratter, 2006).

Segundo IPT (1981), a região está localizada na Zona de Áreas Indivisas da Província do Planalto Ocidental cuja estrutura do relevo é dada por camadas sub-horizontais, com leve caimento para oeste, o que forma uma extensa plataforma estrutural bastante suavizada. O relevo é predominantemente do tipo colinoso e com baixas declividades (<15%). A altimetria nas proximidades da área de estudo varia entre 560 e

700 m, sendo possível encontrar relevos de morrotes alongados e espigões, “onde predominam interflúvios sem orientação preferencial, topos angulosos e achatados, vertentes ravinadas, com perfis retilíneos, drenagem de média a alta densidade, padrão dendrítico e vales fechados”, em contraposição ao relevo colinoso predominante na região (SIGRH, 2018).

A EEcSB localiza-se sobre o Sistema Aquífero Bauru (SAB), um sistema aquífero sedimentar de extensão regional que ocupa a maior parte da região oeste do território do Estado de São Paulo, com uma área aproximada de 96 mil km² (Iritani e Ezaki, 2008). O SAB representa uma das reservas hídricas mais importantes do Estado, servindo como fonte de abastecimento público para muitos municípios. Na região do Médio Paranapanema (UGRHI-17), o SAB é utilizado para suprir 75% da sua demanda socioeconômica (FIESP, 2005). De acordo com Silva et al. (2005),

o SAB é formado pelos aquíferos Marília, Adamantina, Birigui, Santo Anastácio e Caiuá, e os aquíferos Araçatuba e Pirapozinho. Na EECsB, o aquífero Adamantina é predominante, considerado livre a semiconfinado e contínuo apresentando um comportamento hidráulico bastante heterogêneo e anisotrópico, mesmo em localidades relativamente próximas, devido a variações das concentrações de argila nos arenitos (Silva, 2003). As características gerais do SAB apresentam porosidade efetiva de 5% a 15%; transmissividade de 10 a 300 m²/dia; permeabilidade de 0,1 a 3 m/dia; capacidade específica entre 0,02 m³/h/m a 4,9 m³/h/m; condutividade hidráulica de 0,02 a 3,66 m/dia e; vazão média explorável em torno de 80m³/h (DAEE/IG/IPT/CPRM, 2005).

Segundo Oliveira et al. (1999), o solo predominante nos domínios da EECsB é o Latossolo Vermelho (LV56). Os Latossolos, segundo EMBRAPA (2006), são solos formados por material mineral apresentando o horizonte diagnóstico B latossólico em estágio de evolução muito avançada o que resulta em intensa intemperização de minerais primário e secundários. São, em geral, solos com boas propriedades físicas, situados, na maioria dos casos, em relevo favorável ao uso de máquinas agrícolas. São solos de excepcional porosidade total e, conseqüentemente, de boa drenagem interna, na EECsB apresenta textura média a arenosa devido ao embasamento rochoso. No entorno da área, também ocorrem os Argissolos Vermelho-Amarelos (PVA) e, acompanhando a faixa de drenagem do Rio Pardo, os Nitossolos Vermelhos (NV) (Melo e Durigan, 2011).

Dados utilizados

A modelagem foi conduzida a partir de dados provenientes de levantamentos de informações sobre o terreno extraídas de um Modelo Numérico do Terreno (MNT) (1 - elevação, 2 - declividade, 3 - Índice Topográfico de Umidade (ITU) e 4 - distância euclidiana entre o poço e a drenagem mais próxima); informações sobre a vegetação obtidos a partir de produtos de sensoriamento remoto (5 - Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI); 6 - Índice de Vegetação Realçado 2 (EVI2), 7 - Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI) e 8 - Índice de Vegetação de Umidade por Diferença Normalizada (NDWI)); informações sobre a textura (frações de 9 - areia, 10 - argila e 11 - silte), granulometria das partículas (12 - muito fina, 13 - fina, 14 - média, 15 - grossa), hidrologia (16 - condutividade hidráulica (K) e manejo (17 - resistência a penetração média até 60 cm de profundidade (RPMed)) dos solos

coletadas a campo; além de informações sobre as águas subterrâneas obtidas em piezômetros (18 - níveis médios (NM), 19 - níveis mínimos (NMin), 20 - níveis máximos (NMax) e 21 - temperatura (T)), totalizando 21 variáveis explicativas associadas para cada um dos 56 pontos de medição do nível freático. A seguir são apresentados detalhes sobre variáveis.

O MNT foi obtido com base nas informações planialtimétricas digitalizadas (curvas de nível, pontos cotados e hidrografia) a partir da carta topográfica do IBGE de 1967, cartografada na escala 1:50.000. Com isso, foi possível encontrar a declividade e calcular o ITU (Beven e Kirkby, 1979), Equação 5.

$$ITU = \ln \left(\frac{Ac}{\tan \beta} \right) \quad (1)$$

em que: Ac é a área de contribuição ao pixel (m²) e β é a declividade de cada pixel (radianos).

Para extrair as informações relativas aos índices de vegetação e de umidade da área foram utilizadas as imagens do satélite Landsat 8, com base nas bandas espectrais 4, 5 e 6 do sensor OLI (*Operational Land Imager*). As Equações de 2 a 5 se referem, respectivamente, ao NDVI (Rouse et al., 1973), SAVI (Huete, 1988), NDWI (Gao, 1996) e EVI2 (Jiang et al., 2008).

$$NDVI = \frac{(\rho_{IV} - \rho_V)}{(\rho_{IV} + \rho_V)} \quad (2)$$

$$SAVI = \frac{(1+L)(\rho_{IV} - \rho_V)}{(\rho_{IV} + \rho_V + L)} \quad (3)$$

$$NDWI = \frac{\rho_{IV} - \rho_{MIR}}{\rho_{IV} + \rho_{MIR}} \quad (4)$$

$$EVI2 = 2,5 \frac{\rho_{IV} - \rho_V}{(\rho_{IV} + (2,4 * \rho_V) + 1)} \quad (5)$$

em que: ρ_{IV} corresponde ao fluxo radiante refletido no infravermelho próximo, ρ_V ao fluxo radiante refletido no vermelho da região do visível e ρ_{MIR} ao infravermelho médio; o fator L é a constante que minimiza o efeito do solo; 2,5 corresponde a um fator de ganho, 2,4 ao coeficiente de ajuste para o efeito de aerossóis na atmosfera e 1 ao um fator de ajuste do solo.

Os dados referentes aos atributos físicos dos solos foram obtidos conforme descrito em Santarosa e Manzione (2018), com amostras de solo coletadas em aproximadamente 50 cm de profundidade, conforme Santos et al. (2015) e analisadas segundo EMBRAPA (1997). Os mesmos dados foram utilizados para calcular a

condutividade hidráulica pelo método de Hazen conforme descrito em Fetter (2001). Já os dados de resistência do solo à penetração, foram coletadas com um penetrômetro digital de precisão da marca FALKER (modelo Penetrolog PLG1020), obtidos por pressão em unidade de quilopascal.

Por fim, as informações sobre as águas subterrâneas foram extraídas da série histórica que teve início em 7/03/2016 e que foi finalizada em 10/09/2017. A temperatura da água em graus Celsius foi coletada com um termômetro digital de contato no dia 05/09/2017. A Figura 4 mostra a localização dos poços de monitoramento das águas subterrâneas na área de estudo.

Figura 4. Localização dos poços de monitoramento das águas subterrâneas.

Seleção de variáveis explicativas

Devido ao grande número de variáveis disponíveis para explicar a oscilação dos níveis freáticos na área de estudo, foi necessário realizar uma seleção das variáveis que melhor explicaram a variabilidade geral dos dados. Para isso, foram utilizadas técnicas de análise de dados multivariados. A análise de dados multivariados trata de dados provenientes de diversas medidas obtidas sobre uma mesma amostra, considerando não apenas as características particulares de cada uma das medidas com relação a amostra, mas, também, as possíveis relações existentes entre as múltiplas variáveis utilizadas na pesquisa (Landim, 2011). Os métodos da estatística multivariada são utilizados com o objetivo de

simplificar a interpretação do fenômeno em estudo pela construção de índices ou variáveis alternativas capazes de sintetizar a informação original. Suas ferramentas possibilitam investigar as relações de dependência entre as variáveis, comparar populações e validar testes de hipóteses.

Entre as técnicas de análise multivariada, estão a análise de correlação canônica, regressão logística, análise de agrupamentos (ou cluster), análise multivariada da variância (MANOVA), análise fatorial e análise de componentes principais (ACP) (Manley e Alberto, 2019). Nesse estudo a seleção das variáveis para compor o modelo explicativo de oscilação dos níveis freáticos na EECB foi feita por análise de componentes principais (ACP).

Análise de Componentes Principais (ACP)

A ACP é um método da estatística multivariada que estuda a relação de interdependência de um conjunto de variáveis de um determinado sistema. Para Kendall (1980), entre as contribuições da análise de componentes principais para o estudo, estão:

1. Simplificação da estrutura de dados por meio da transformação de um conjunto de dados.
2. Agrupamento das observações e das variáveis segundo suas similaridades.
3. Avaliar a importância de cada caractere e proporcionar a eliminação daqueles que contribuem pouco, em termos de variação, no grupo de indivíduos avaliados.

A ACP é considerada um método exploratório e tem como objetivo identificar padrões nos dados e expressá-los de uma maneira na qual suas semelhanças e diferenças sejam destacadas. Uma vez que os padrões são reconhecidos, é possível compactar o número de variáveis, reduzindo, então, o número de dimensões do estudo com a menor perda possível de informações. Na ACP é realizada uma transformação linear de todas as variáveis originais

em novas variáveis, onde a primeira nova variável computada é responsável pela maior parte da variação possível existente no conjunto de dados, a segunda pela maior variação remanescente, e assim por diante até que toda variação do conjunto seja explicada (Landim, 2011). A ACP foi avaliada por Wang e Du (2000) como uma técnica robusta, capaz de trabalhar com dados não normais com alto desempenho.

Dessa forma, a transformação realizada no processo de ACP resulta em um conjunto de variáveis de mesma dimensão denominadas de componentes principais (CP). Os CP apresentam propriedades relevantes: cada CP é uma combinação linear de todas as variáveis originais, são independentes entre si e estimados com a finalidade de reter o máximo de informação, em termos da variação total presente nos dados (Manley e Alberto, 2019). Conforme Johnson e Wichern (2013) explicam, geometricamente, as CP representam um novo sistema de coordenadas obtido pela rotação dos sistemas originais. Os eixos formados indicam as direções da máxima variabilidade. A Figura 5 considera uma amostra com duas variáveis de n observações.

Figura 5. Sistema de coordenadas X_1 e X_2 , novo sistema Y_1 e Y_2 , ângulos de rotação dos novos eixos α_1 e α_2 e autovalores λ_1 e λ_2 .

Pela rotação dos eixos obtêm-se um novo sistema de coordenadas, em que Y_1 representa o eixo principal e Y_2 o eixo secundário, sendo α_1 e α_2 os ângulos formados entre os eixos originais X_1 e X_2 e os eixos Y_1 e Y_2 do novo sistema de coordenadas. A direção dos eixos é determinada pelos autovetores, aplicando-se aos ângulos os cossenos diretores ($e_{11} = \cos(\alpha_1)$ e $e_{21} = \cos(\alpha_2)$). Os autovalores λ_1 e λ_2 representam a variabilidade contida em cada um dos novos eixos.

A utilização da análise de componentes principais pode resolver problemas como da multicolinearidade das variáveis, pois permite transformar um conjunto de variáveis originais intercorrelacionadas em um novo conjunto de variáveis não correlacionadas; para realizar a modelagem da interação entre fatores em experimentos sem repetição; em estudos de divergência e agrupamento; entre outras possibilidades (Hongyou et al., 2015). Uma vez selecionadas as variáveis que contem o maior potencial preditivo, as mesmas foram adotadas para construção do modelo de regressão linear múltipla para explicar a oscilação dos níveis freáticos na EECsB.

Modelo de regressão linear múltipla

A análise de regressão linear múltipla é uma técnica estatística utilizada para analisar a relação entre uma variável dependente e múltiplas variáveis independentes, podendo ser capaz ou não de explicar as variações existentes sobre a variável dependente (Bussab e Morettin, 2017).

O modelo de regressão linear múltipla pode descrito conforme a equação 6:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon \quad (6)$$

em que: Y = variável dependente; X_n = variável independente; β_0 = componente aleatória da variação de Y ; β_n = coeficientes de regressão linear; n = número de variáveis; e ε = erro que captura a variação em Y não explicada pelas variáveis X .

Para haver regressão de Y em X deve-se testar a hipótese dos coeficientes de regressão $\beta_1 = 0, \beta_2 = 0, \beta_3 = 0, \dots, \beta_n = 0$, ao mesmo tempo, pois se a hipótese for aceita, não existe a equação de regressão. Associada à construção de um modelo de regressão, a análise de variância é utilizada para testar as hipóteses do modelo, verificando a significância ou incerteza do modelo de melhor ajuste (Hair Jr. et al., 2009). As equações de regressão múltipla utilizam o método dos mínimos quadrados para obter uma linha reta para os dados,

reduzindo a soma dos erros de previsão elevados ao quadrado entre os valores reais de y e os previstos pela estimativa da linha de regressão (Witte e Witte, 2005).

O processo para a construção do modelo de regressão múltipla inicia-se com a especificação dos objetivos de análise, definição da variável dependente e das variáveis independentes, que envolve a verificação da qualidade dos dados, o diagnóstico de relacionamento e interação dos dados. A seguir são testadas as suposições da análise de regressão linear múltipla para as variáveis explicativas, caso não necessite de transformações para atender as suposições, então o modelo será estimado e posteriormente analisado e validado. Segundo Neter et al. (2005), ao se construir um modelo de regressão linear múltipla, deve-se avaliar a linearidade, homocedasticidade, normalidade dos resíduos e o coeficiente de correlação existente entre as variáveis independentes, sendo que neste último se os valores forem altos, possivelmente terá o fenômeno da multicolinearidade, na qual reduz valor preditivo de qualquer variável independente.

Neste estudo, o modelo de regressão linear múltipla foi ajustado tendo como variável dependente alvo o nível freático (NF) da área de estudo para a data de 10 de setembro de 2017, utilizando como base uma das datas de coleta de dados a campo. Com isso, avaliou-se a significância das variáveis explicativas encontradas na ACP e selecionadas para o modelo de regressão linear múltipla (sendo o valor $p < 5\%$). O ajuste do modelo foi avaliado pelo coeficiente de determinação (R^2) ajustado, predito e normalidade dos resíduos. A validação do modelo foi feita utilizando dados de nível freático coletados na mesma campanha de 10 de setembro de 2017.

As análises foram conduzidas utilizando o software estatístico MINITAB (Minitab, 2018).

Resultados e discussão

A variabilidade dos dados foi explicada pela análise de componentes principais (Tabela 1). A partir das cinco componentes principais, as variáveis originais de maior representatividade para elaboração do modelo de predição espacial foram selecionadas. Para definir as aquelas que melhor representaram a variabilidade dos dados, foram considerados os valores dos coeficientes das funções ACP acima de 0,34, reduzindo o conjunto original de variáveis para 8.

Tabela 1. Autovetores calculados para as primeiras cinco componentes principais (PC) obtidas a partir da ACP.

	Variável	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
Terreno	Distância	0,13	-0,27	0,36	-0,05	0,07
	Elevação	0,18	-0,06	0,35	-0,11	-0,07
	Declividade	0,10	0,22	0,27	0,10	0,12
	ITU	-0,01	-0,10	-0,32	0,07	-0,19
Índices de vegetação	NDVI	0,29	-0,14	-0,05	0,32	-0,06
	SAVI	0,26	-0,19	-0,10	0,34	-0,05
	EVI2	0,28	-0,18	-0,11	0,34	-0,06
	NDWI	0,28	-0,12	-0,13	0,29	-0,21
Características do solo	Areia	0,18	-0,17	0,22	-0,24	-0,41
	Argila	-0,15	0,18	-0,18	0,30	0,41
	Silte	-0,13	-0,02	-0,23	-0,32	-0,05
	Muito fina	-0,23	0,18	0,08	0,25	-0,22
	Fina	-0,21	0,16	0,27	0,26	-0,22
	Média	0,25	-0,20	-0,16	-0,28	0,26
	Grossa	0,15	-0,08	-0,34	-0,22	0,10
	Condutividade hidráulica	0,18	-0,14	0,34	-0,10	0,17
	Resistência a penetração	-0,02	0,01	-0,20	-0,12	-0,44
Águas subterrâneas	Nível médio	0,27	0,36	-0,04	-0,09	-0,09
	Nível máximo	0,28	0,31	0,03	-0,11	-0,13
	Nível mínimo	0,23	0,38	-0,09	-0,05	0,04
	Temperatura	-0,17	-0,35	-0,07	0,04	0,06
	Cumulativo	0,24	0,41	0,53	0,63	0,70

Assim, as variáveis SAVI, EVI2, areia, argila, níveis médios e mínimos, resistência à penetração e temperatura foram selecionadas. Em seguida, com base na significância das variáveis por meio dos valores dos autovetores, uma nova seleção foi feita e resultou em 5 variáveis explicativas. As porcentagens das variâncias dos fatores foram somadas até se atingir um valor mínimo de 70%. Os resultados mostraram que a variabilidade mínima global foi alcançada com as cinco primeiras componentes, com variância acumulada de 70%. A partir disso, as demais componentes foram descartadas. Esse intervalo de porcentagem é determinado de modo que o conjunto de fatores selecionados explique uma variabilidade mínima do global.

Com base no grupo de componentes principais, as variáveis com maior relevância foram selecionadas a partir dos coeficientes com maiores valores das funções ACP. O ajuste do modelo de regressão linear múltipla se deu, então, com as variáveis SAVI, EVI2, níveis freáticos médios e porcentagem de areia e argila. A Tabela 2 apresenta a significância das variáveis utilizadas no modelo de regressão linear múltipla.

Tabela 2. Valores de significância das variáveis preditoras selecionadas na ACP.

Variável	valor <i>p</i>
SAVI	0,010
EVI	0,018
Areia	0,002
Argila	0,002
Nível médio (NM)	<0,000

O modelo encontrado para o nível freático (NF) é dado na Equação 7:

$$NF = -15,82 + 12,36 \text{ SAVI} - 10,16 \text{ EVI} + 0,14 \text{ Areia} + 0,13 \text{ Argila} + 0,98 \text{ NM} \quad (7)$$

Os resultados mostraram que, para a data proposta de 10 de setembro de 2017, o modelo apresenta um ajuste robusto aos dados. A porcentagem que é explicada pelo modelo corresponde medida pelo R^2 ajustado foi de 97%, no entanto, o R^2 predito foi de 95%, mostrando que o modelo tem capacidade preditiva para novas observações. Os coeficientes foram considerados

significativos à uma significância de 5% determinada pela análise de variância ANOVA.

A avaliação visual do modelo quanto a normalidade dos resíduos e sua variância pode ser observada na Figura 6. De forma geral, os resíduos são considerados normais, distribuindo-se sob a linha reta azul e quanto ao seu histograma, conforme os gráficos à esquerda superior (A) e inferior (C), respectivamente, da Figura 6. Os gráficos à direita da Figura 6 (B e D) mostram, respectivamente, a distribuição dos resíduos quando comparados aos valores ajustados e aos valores observados, flutuando em torno de zero, o que indica uma variância constante. Os resíduos dos valores ajustados variam entre 0,25 e -0,25 e os resíduos das observações representam o desvio padrão de 0,19 metros indicado nas estatísticas de ajuste.

Assim, são preenchidos os requisitos expostos por Neter et al. (1996) de significância dos coeficientes de regressão, normalidade dos resíduos e variância constante dos resíduos e o modelo é aceito.

A Figura 7 exhibe a validação do modelo com uma comparação entre os valores observados e os valores estimados pelo modelo. Percebe-se que os valores estimados pelo modelo são bastante próximos aos dados observados em campo, demonstrando a funcionalidade e o ajuste robusto do modelo.

Os métodos estatísticos multivariados vêm sendo aplicado nos estudos das águas subterrâneas e têm auxiliado na identificação dos mecanismos que afetam as características desses recursos hídricos (Cerar e Mali, 2016; Kim et al., 2005). De acordo com Prasanna et al. (2010), as ferramentas de estatística multivariada podem ser úteis, por exemplo, no entendimento dos fluxos de águas subterrâneas em sistemas de aquíferos complexos, influenciados por diversos fatores ambientais. O modelo construído pode também ser interpretado do ponto de vista físico, com o nível freático médio representando características da série histórica de oscilação dos níveis na área de estudo, as frações areia e a argila correspondendo a fatores pedológicos estáticos relacionados com o armazenamento e infiltração da água no solo e os índices de vegetação representando a sazonalidade e a sensibilidade da vegetação presente na área frente as variações climáticas.

Figura 6. Avaliação do modelo de predição dos níveis freáticos.

Figura 7. Validação do modelo comparando dados observados 10 de setembro de 2017 e os dados estimados pelo modelo.

Em conformidade com os resultados encontrados, Manzione et al. (2015) utilizaram análise fatorial multivariada para identificar os principais fatores que influenciam nas variações do lençol freático em uma área de afloramento do Sistema Aquífero Guarani, em Brotas/SP. As variáveis de maior relevância foram: tamanho das partículas de areia, atributos do terreno, vegetação e manejo do solo; sendo que o tamanho das partículas e os atributos do terreno foram considerados as principais forças responsáveis pela flutuação da água subterrânea na bacia. Yan et al. (2018) utilizaram um modelo de regressão linear para estimar o lençol freático diário em uma planície costeira. Com um coeficiente de determinação (R^2) de 84%, encontraram que o nível responde as variáveis climáticas de temperatura e de evapotranspiração e ao estágio do rio localizado a 2 km das medições. Já Salles et al. (2018), por meio do método dos quadrados mínimos, identificaram ser possível estimar a quantidade de água armazenada em aquíferos porosos e o comportamento da água subterrânea em solos do planalto central brasileiro a partir da geomorfologia e das características físicas do solo. Apesar de bons resultados descritos na literatura, Raghavendra e Deka (2015) salientam que a eficiência de qualquer análise de regressão depende principalmente da qualidade dos dados que estão sendo alimentados no modelo e, a partir de então, o pré-processamento adequado dos dados usando outras técnicas ou discretização usando outros métodos ajuda a melhorar o modelo encontrado por análise de regressão.

Análises das relações entre níveis freáticos e propriedades do solo tem implicações na gestão dos recursos hídricos, mudanças do clima e do uso e ocupação da terra na produção agrícola e agricultura de precisão (Zipper et al., 2015). Riley (2018) adiciona que resultados obtidos como os de modelos de regressão utilizados nesse estudo implicam que, além de outros benefícios ambientais, os formuladores de políticas precisam prestar atenção ao impacto de áreas de conservação nas condições regionais de aquíferos em regiões onde os níveis de água subterrânea são uma preocupação, mas podem esperar que a recarga ocorra. A modelagem com base em diferentes variáveis, como precipitação e evapotranspiração, pode acrescentar informações importantes aos resultados encontrados e ajudar no entendimento dos processos que influenciam nas oscilações dos níveis freáticos e determinação de níveis de água subterrânea para planejamento do uso da terra e

tomadas de decisão, facilitando a obtenção de informações sobre as águas subterrâneas para o monitoramento desse recurso.

Informações obtidas a partir de modelos como o apresentado nesse estudo podem além de auxiliar a tomada de decisão quanto ao uso da água, subsidiar os instrumentos de recursos hídricos previstos na Lei nº 9433 (Brasil, 1997), funcionando como ferramentas de suporte por exemplo aos planos de bacia, outorga pelo uso da água e cobrança pelos recursos hídricos. Segundo Dalcin e Marques (2020), estratégias que impõem permissões limitadas de água a usuários econômicos e regiões das bacias hidrográficas indicam onde (e quando) os programas de conservação de água devem ser aplicados, juntamente com metas quantitativas (quanto). Assim, conflitos pela alocação de água podem ser evitados, uma vez que sustentadas por modelos robustos, as decisões tentem a ser mais sólidas. Dessa forma, decisões técnicas e embasadas cientificamente podem melhorar a gestão da água, em especial dos recursos hídricos subterrâneos cujo monitoramento é escasso e oneroso. A obtenção de series temporais de águas subterrâneas ainda é um desafio, devido ao alto custo de implantação de redes de monitoramento e perfuração de poços. Quando essas séries são obtidas, o uso desses dados e consequente transformação deles em informações que auxiliem a gestão dos recursos hídricos subterrâneos ainda é feita de maneira subutilizada. A elaboração de modelos capazes de estimar os níveis freáticos é importante para a elaboração de planos de manejo e para que o uso dessas águas seja feito de modo sustentável (Manzione, 2014). Os resultados dessa pesquisa mostram que o ajuste de um modelo de regressão linear múltiplo pode ser útil para determinar níveis freáticos baseados em dados obtidos remotamente e de levantamentos históricos, sem a necessidade de aferição constantes à campo.

Conclusões

A partir das análises realizadas foi possível obter um modelo estatístico híbrido, baseado em regressão linear múltipla, que explicou o comportamento dos níveis freáticos na EECSB e FESB considerando aspectos texturais do solo, resposta da vegetação e características históricas dos níveis freáticos monitorados na área de estudo. A ACP foi um procedimento eficiente para explicar a variabilidade global dos dados disponíveis e reduzir o conjunto inicial de 21 variáveis para 5

variáveis explicativas de maior importância no processo de oscilação dos níveis freáticos. O modelo de regressão linear múltiplo foi considerado robusto e com boa capacidade preditiva considerando os pressupostos de significância dos coeficientes do modelo, normalidade e variância constante dos resíduos, além de R^2 predito e ajustado de 97 e 95%, respectivamente. Os resultados são úteis para auxiliar os instrumentos de gestão de recursos hídricos como ferramentas de suporte ao planejamento do uso da água e tomada de decisão.

Agradecimentos

À FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) - Processos 2014/04524-7 e 2016/09737-4 de auxílio regular à pesquisa pelo suporte financeiro para realização dessa pesquisa. À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela bolsa de mestrado da segunda autora.

Referências

- Ahmed, S., Sarah, S., Nabi, A., Owais, S., 2010. Performing unbiased groundwater modelling: application of the theory of regionalised variables, in: Weather, H.S., Mathias, S.A., Li, X. (Org.), Groundwater modelling in arid and semi-arid areas. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 63-74.
- Alaghmand, S., Beecham, S., Hassanli, A., 2014. Impacts of Vegetation Cover on Surface-Groundwater Flows and Solute Interactions in a Semi-Arid Saline Floodplain: A Case Study of the Lower Murray River, Australia. Environmental Processes [online] 1. Disponível: <http://doi.org/10.1007/s40710-014-0003-0>. Acesso: 14 mai. 2020.
- ANA. Agência Nacional de Águas, 2018. Conjuntura de recursos hídricos Brasil 2018. Brasília. Disponível: http://conjuntura.ana.gov.br/static/media/Conjuntura2018_Quantidade_Qualidade_Agua.3dbb18b1.pdf. Acesso: 22 set. 2019.
- Antunes, C., Díaz Barradas, M.C., Vieira, S., Zunzunegui, M., Pereira, Â., Anjos, A., Correia, O., Pereira, M.J., Máguas, C., 2018. Contrasting plant water-use responses to groundwater depth in coastal dune ecosystems. Functional Ecology [online] 32. Disponível: <http://doi.org/10.1111/1365-2435.13110>. Acesso: 14 mai. 2020.
- Beven, K.J., Kirkby, M.J., 1979. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. Hydrological Sciences Bulletin [online] 24. Disponível: <http://doi.org/10.1080/02626667909491834>. Acesso: 20 abr. 2018.
- Brasil, 1997. Lei nº 9433, 8 de janeiro.
- Bussab, W.O., Morettin, P.A., 2017. Estatística básica, 9 ed. Saraiva, São Paulo.
- CEPAGRI. Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura, 2016. Clima dos Municípios Paulistas. Campinas. Disponível: <http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima-dos-municipios-paulistas>. Acesso: 16 mar. 2019.
- Cerar, S., Mali, N., 2016. Assessment of presence, origin and seasonal variations of persistent organic pollutants in groundwater by means of passive sampling and multivariate statistical analysis. Journal of Geochemical Exploration [online] 170. Disponível: <http://doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.08.016>. Acesso: 14 mar. 2018.
- Coleridge, S.T., 2006. O ciclo da água e a água subterrânea, in: Press, F., Siever, R., Grotzinger, J., Jordan, T.H. (Org.), Para entender a Terra. Bookman, Porto Alegre, pp. 313-340.
- Condon, L.E., Maxwell, R.M., 2015. Evaluating the relationship between topography and groundwater using outputs from a continental-scale integrated hydrology model. Water Resources Research [online] 51. Disponível: <http://doi.org/10.1002/2014WR016774>. Acesso: 14 mai. 2020.
- Crosbie, R.S., Peeters, L.J.M., Herron, N., McVicar, T.R., Herr, A., 2018. Estimating groundwater recharge and its associated uncertainty: Use of regression kriging and the chloride mass balance method. Journal of Hydrology [online] 561. Disponível: <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.08.003>. Acesso: 17 mai. 2020.
- 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. Mapa de águas subterrâneas do Estado de São Paulo escala: 1:1.000.000: nota explicativa. São Paulo. Disponível: http://www.daee.sp.gov.br/images/documentos/MAPA_AS.pdf. Acesso: 23 out. 2018.

- Dalcin, A.P., Marques, G.F., 2020. Integrating water management instruments to reconcile a hydro-economic water allocation strategy with other water preferences. *Water Resources Research* [online] 56. Disponível: <https://doi.org/10.1029/2019WR025558>. Acesso: 21 mai. 2020.
- Durigan, G., Ratter, J.A., 2006. Successional changes in cerradão and cerrado/forest ecotonal vegetation in western São Paulo State, Brazil, 1962-2000. *Edinburgh Journal of Botany* [online] 63. Disponível: <http://doi.org/10.1017/S0960428606000357>. Acesso: 27 out. 2018.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuária, 1997 Manual de métodos de análises de solo. Rio de Janeiro.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuária, 2006. Sistema brasileiro de classificação de solos. Rio de Janeiro.
- Fetter, C.W., 2001. Applied hydrogeology, 4 ed. Prentice Hall, Upper Saddle River.
- FIESP. Federação das Indústrias do Estado de São Paulo, 2005. Orientações para a utilização de Águas subterrâneas no Estado de São Paulo. São Paulo.
- Gao, B.C., 1996. NDWI – A Normalized Difference Water Index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment* [online] 58. Disponível: [http://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](http://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3). Acesso: 25 jul. 2018.
- Gharbia, S.S., Smullen, T., Gill, L., Johnston, P., Pilla, F., 2018. Spatially distributed potential evapotranspiration modeling and climate projections. *Science of The Total Environment* [online] 633. Disponível: <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.208>. Acesso: 14 mai. 2020.
- Hair Jr., J.F., Black, W.C., Babin, B.J., Anderson, R.E., Tatham, R.L., 2009. Análise multivariada de dados, 6 ed. Bookman, Porto Alegre.
- Han, W.S., Graham, J.P., Choung, S., Park, E., Choi, W., Kim, Y.S., 2018. Local-scale variability in groundwater resources: Cedar Creek Watershed, Wisconsin, U.S.A.. *Journal of Hydro-environment Research* [online] 20. Disponível: <http://doi.org/10.1016/j.jher.2018.04.007>. Acesso: 12 mai. 2020.
- Hirata, R.C.A., Zobbi, J., Oliveira, F., 2010. Águas subterrâneas: reserva estratégica ou emergencial, in: Bicudo, C., Tundisi, J.G., Scheuenstuhl, M. (Org.), Águas do Brasil: análises estratégicas. Instituto de Botânica, São Paulo, pp. 149–161.
- Honda, E.A., Nizoli, E.C., 2005. Caracterização das águas da Estação Ecológica de Águas De Santa Bárbara. Relatório Técnico. Instituto Florestal, São Paulo.
- Hongyu, K., Sandanielo, V.L.M., Oliveira Junior, G.J., 2015. Análise de Componentes Principais: resumo teórico, aplicação e interpretação. *Engineering and Science* [online] 5. Disponível: <http://dx.doi.org/10.18607/ES201653398>. Acesso: 25 jul. 2018.
- Huete, A.R., 1988. A soil adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment* [online] 25. Disponível: [http://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](http://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X). Acesso: 2 ago. 2018.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2013. Pesquisa de Informações Básicas Estaduais (ESTADIC). Brasília. Disponível: <http://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/instrumentos-de-coleta/doc2886.pdf>. Acesso: 12 mai. 2019.
- Iritani, M.A., Ezaki, S., 2008. As águas subterrâneas do Estado de São Paulo. Secretaria do Estado do Meio Ambiente, São Paulo.
- IPT. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, 1981. Mapa geológico do Estado de São Paulo. Escala 1:500,000. São Paulo.
- Jakeman, A.J., Barreteau, O., Hunt, R.J., Rinaudo, J.D., Ross, A., Arshad, M., Hamilton, S., 2016. Integrated Groundwater Management: An Overview of Concepts and Challenges. In: Jakeman, A.J., Barreteau, O., Hunt, R.J., Rinaudo, J.D., Ross, A. (Org.), Integrated Groundwater Management: Concepts, Approaches and Challenges. Springer, Berlin. Disponível: http://doi.org/10.1007/978-3-319-23576-9_1. Acesso: 12 fev. 2019.
- Jiang, Z, Huete, A.R., Didan, K., Miura, T., 2008. Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band. *Remote Sensing of Environment* [online] 112. Disponível: <http://doi.org/10.1016/j.rse.2008.06.006>. Acesso: 17 out. 2018.
- Johnson, R.A., Wichern, D.W., 2013. Applied multivariate statistical analysis, 6 ed. Pearson, Londres.
- Kendall, M.G., 1980. A course in multivariate analysis, 2 ed. Charles Griffin, Londres.

- Kløve, B., Ala-Aho, P., Bertrand, G., Gurdak, J.J., Kupfersberger, H., Kværner, J., Muotka, T., Mykrä, H., Preda, E., Rossi, P., Uvo, C.B., Velasco, E., Pulido-Velazquez, M., 2014. Climate change impacts on groundwater and dependent ecosystems. *Journal of Hydrology* [online] 518. Disponível: <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.06.037>. Acesso: 14 mai. 2020.
- Koch, J., Berger, H., Henriksen, H.J., Sonnenborg, T.O., 2019. Modelling of the shallow water table at high spatial resolution using random forests. *Hydrology and Earth System Sciences* [online] 23. Disponível: <https://doi.org/10.5194/hess-23-4603-2019>. Acesso: 15 mai. 2020.
- Kong, J., Xin, P., Hua, G., Luo, Z., Shen, C., Chen, D., Li, L., 2015. Effects of vadose zone on groundwater table fluctuations in unconfined aquifers. *Journal of Hydrology* [online] 528. Disponível: <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.06.045>. Acesso: 14 mai. 2020.
- Kresic, N., Mikszewski, A., 2012. Hydrogeological conceptual site models: data analysis and visualization. CRC Press, Boca Raton.
- Kim, J.H., Kim, R.H., Lee, J., Cheong, T.J., Yum, B.W., Chang, H.W., 2005. Multivariate statistical analysis to identify the major factors governing groundwater quality in the coastal area of Kimje, South Korea. *Hydrological Processes* [online] 19. Disponível: <http://doi.org/10.1002/hyp.5565>. Acesso: 10 dez. 2018.
- Landim, P.M.B., 2011. Análise estatística de dados geológicos multivariados. Oficina de Textos, São Paulo.
- Manly, B.F.J., Alberto, J.A.N., 2019. Métodos estatísticos multivariados: uma introdução, 4 ed. Bookman, Porto Alegre.
- Manziona, R.L., 2014. Incorporação de incertezas associadas à predições de modelos hidrológicos aos instrumentos de gestão em recursos hídricos. *Caderno Prudentino de Geografia* 36, 215–227.
- Manziona, R.L., 2015. Águas Subterrâneas: Conceitos e aplicações sob uma visão multidisciplinar. Paco Editorial, Jundiaí.
- Manziona, R.L., Tanikawa, D.H., Soldera, B.C., 2014. Relação entre a resposta espectral da vegetação em diferentes cultivos agrícolas e níveis freáticos em área de recarga do Sistema Aquífero Guarani. *Revista Águas Subterrâneas* [online] 28. Disponível: <http://doi.org/10.14295/ras.v28i1.27381>. Acesso: 19 mai. 2020.
- Manziona, R.L., Soldera, B.C., Paes, C.O., Wendland, E.C., 2015. Analyses of water table depths variations in an outcrop area of the Guarani Aquifer System in Brotas/SP-Brazil. *Irriga* [online] 1. Disponível: <http://dx.doi.org/10.15809/irriga.2015v1n1p186>. Acesso: 12 jan. 2019.
- Mathias, S.A., Weather, H.S., 2010. Groundwater modelling in arid and semi-arid areas: an introduction, in: Weather, H.S., Mathias, S.A., Li, X. (Org.), Groundwater modelling in arid and semi-arid areas. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 1–4.
- Melo, A.C.G., Durigan, G., 2011. Plano de manejo da Estação Ecológica de Santa Bárbara. Instituto Florestal, São Paulo. Disponível: http://iflorestal.sp.gov.br/files/2013/03/Plano_de_Manejo_EEc_Santa_Barbara.pdf. Acesso: 15 mai. 2018.
- Millar, D.J., Cooper, D.J., Ronayne, M.J., 2018. Groundwater dynamics in mountain peatlands with contrasting climate, vegetation, and hydrogeological setting. *Journal of Hydrology* [online] 561. Disponível: <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.04.050>. Acesso: 14 mai. 2020.
- MINITAB INC., 2018. Minitab 16. Minitab Inc., State College.
- Neter, J., Kutner, M.H., Nachtsheim, C.J., Wasserman, W., 1996. Applied linear statistical models, 4 ed. Irwin, Chicago.
- Oliveira, J.B., Camargo, M.N., Rossi, M., Calderano Filho, B., 1999. Mapa Pedológico do Estado de São Paulo. 1:500,000. IAC/FAPESP, São Paulo.
- Prasanna, M.V., Chidambaram, S., Srinivasamoorthy, K., 2010. Statistical analysis of the hydrogeochemical evolution of groundwater in hard and sedimentary aquifers system of Gadilam river basin, South India. *Journal of King Saud University* [online] 22. Disponível: <http://doi.org/10.1016/j.jksus.2010.04.001>. Acesso: 14 mai. 2018.
- Pöschke, F., Nützmann, G., Engesgaard, P., Lewandowski, J., 2018. How does the groundwater influence the water balance of a lowland lake? A field study from Lake Stechlin, north-eastern Germany. *Limnologica* [online] 68. Disponível: <http://doi.org/10.1016/j.limno.2017.11.005>. Acesso: 14 mai. 2020.

- Raghavendra, S.N., Deka, P.C., 2015. Forecasting monthly groundwater level fluctuations in coastal aquifers using hybrid Wavelet packet–Support vector regression. *Cogent Engineering* [online] 2. Disponível: <http://doi.org/10.1080/23311916.2014.999414>. Acesso: 21 mai. 2020.
- Riley, D.T., 2018. Using regression analysis to determine land cover impacts on groundwater levels in the High Plains. Dissertação (Mestrado). Lincoln, UNL.
- Rosa, D.R.M., 2006. Evolução das instituições florestais estaduais do estado de São Paulo. Monografia (Graduação). Rio de Janeiro, UFRJ.
- Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., Deering, D.W., 1973. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS, in: ERTS Symposium 3. Washington, pp. 309–317. Disponível: <http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19740022614.pdf>. Acesso: 14 out. 2018.
- Salles, L.M.S., Lima, J.E.F.W., Roig, H.L., Malaquias, J.V., 2018. Environmental factors and groundwater behavior in an agricultural experimental basin of the Brazilian central plateau. *Applied Geography* [online] 94. Disponível: <http://doi.org/10.1016/j.apgeog.2018.02.007>. Acesso: 21 nov. 2018.
- Santarosa, L.V., Manzione, R.L., 2018. Soil variables as auxiliary information in spatial prediction of shallow water table levels for estimating recovered water volume. *RBRH* [online] 23. Disponível: <http://doi.org/10.1590/2318-0331.231820170115>. Acesso: 14 jun. 2019
- Santos, R.D., Santos, H.G., Ker, J.C., dos Anjos, L.H.C., Shimizu, S.H., 2015. Manual de descrição e coleta de solo no campo. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa.
- Seeboonruang, U., 2015. An application of time-lag regression technique for assessment of groundwater fluctuations in a regulated river basin: a case study in Northeastern Thailand. *Environmental Earth Sciences* [online] 73. Disponível: <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3872-7>. Acesso: 14 mai. 2020.
- SIGRH. Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo, 2018. Geomorfologia: mapa geomorfológico do Estado de São Paulo. São Paulo. Disponível: http://www.sigrh.sp.gov.br/public/uploads/documentos/6382/i_2_2geomorfologia.pdf. Acesso: 25 jun. 2018.
- Silva, F.P.E., 2003. Geologia de subsuperfície e hidroestratigrafia do grupo Bauru no Estado de São Paulo. Tese (Doutorado). Rio Claro, UNESP.
- Silva, F.P.E, Chang, K.H., Caetano-Chang, M.R., 2005. Hidroestratigrafia do Grupo Bauru (K) no Estado de São Paulo. *Águas Subterrâneas* [online] 19. Disponível: <http://doi.org/10.14295/ras.v19i2.8225>. Acesso: 18 nov. 2018.
- Tucci, C.E.M., 2005. Modelos hidrológicos. Ed. Universidade UFRGS, Porto Alegre.
- Von Asmuth, J.R., Kotters, M., 2004. Characterising groundwater dynamics based on a system identification approach. *Journal of Hydrology* [online] 296. Disponível: <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.03.015>. Acesso: 31 jan. 2018.
- Wang, F.K., Du, T.C.T., 2000. Using principal component analysis in process performance for multivariate data. *Omega* [online] 28. Disponível: [http://doi.org/10.1016/S0305-0483\(99\)00036-5](http://doi.org/10.1016/S0305-0483(99)00036-5). Acesso: 14 ago. 2018.
- Wang, X., Liu, T., Zheng, X., Peng, H., Xin, J., Zhang, B., 2018. Short-term prediction of groundwater level using improved random forest regression with a combination of random features. *Applied Water Science* [online] 8. Disponível: <http://doi.org/10.1007/s13201-018-0742-6>. Acesso: 14 mai. 2020.
- Witte, R.S., Witte, J.S., 2005. Estatística, 7 ed. LTC, Rio de Janeiro.
- Yan, S., Yu, S., Wu, Y., Pan, D., Dong, J., 2018. Understanding groundwater table using a statistical model. *Water Science and Engineering* [online] 11. Disponível: <http://doi.org/10.1016/j.wse.2018.03.003>. Acesso: 4 jun. 2018.
- Yu, X., Ghasemizadeh, R., Padilla, I.Y., Kaeli, D., Alshawabkeh, A., 2016. Patterns of temporal scaling of groundwater level fluctuation. *Journal of Hydrology* [online] 536. Disponível: <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.03.018>. Acesso: 10 mai. 2020.
- Zipper, S.C., Soyulu, M.E., Booth, E.G., Loheide II, S.P., 2015. Untangling the effects of shallow groundwater and soil texture as drivers of subfield-scale yield variability. *Water Resources Research* [online] 51. Disponível: <https://doi.org/10.1002/2015WR017522>. Acesso: 19 mai. 2020.