XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL PARA IDENTIFICAÇÃO DAS ÁREAS PROPÍCIAS À GERAÇÃO DE ESCOAMENTO EM UMA BACIA DE ENCOSTA

Tomas Carlotto[1]; Alondra Beatriz Alvarez Perez[2]; Nadia Bernardi Bonumá[3] & Pedro Luiz Borges Chaffe[4]

RESUMO – Neste trabalho apresentamos uma simulação computacional do fluxo das águas subterrâneas em aquífero não confinado com uma abordagem bidimensional de diferenças finitas para identificar os locais que favorecem a geração de escoamento em uma bacia de cabeceira pertencente à bacia hidrográfica da lagoa do Peri – Florianópolis-SC. As propriedades hidrogeológicas (i.e., condutividades hidráulicas saturadas K_{sat}) foram estimadas a partir de dados obtidos em cinco pontos distribuídos na bacia. As profundidades do solo foram determinadas a partir de um modelo matemático com base na superfície topográfica e nas profundidades máxima e mínima do solo que assumimos ser 1 m e 20 m respectivamente. A simulação foi iniciada com a bacia em condição de total saturação e representou a variação espaço temporal das áreas saturadas para um período de estiagem de 10 dias. Os resultados proporcionaram a identificação das regiões que tendem a permanecer saturadas durante períodos secos proporcionando a interpretação física do processo de geração do fluxo de base.

ABSTRACT– In this work we present a model of groundwater flow in an unconfined aquifer with a two-dimensional approach to identify the sites that favor the runoff generation in a headwater catchment of the Peri lagoon basin - Florianópolis-SC. The hydrogeological properties (saturated hydraulic conductivities K_{sat}) were estimated from data measured in five points distributed in the basin. Soil depths were determined from a model based on the topographic surface and at the maximum and minimum depths of the soil that we assume to be 1 m and 20 m respectively. The simulation was initiated with the basin in full saturation condition and represented the time space variation of the saturated areas for a drought period of 10 days. The results provided the identification of regions that tend to remain saturated during dry periods providing the physical interpretation of the base flow generation process.

Palavras-Chave – Escoamento subterrâneo, simulação, bacia de encosta.

INTRODUÇÃO

A determinação das áreas propícias à geração de escoamento tem grande importância em casos de bacias hidrográficas de rios efêmeros, visto que a forte influência das variáveis climáticas e

1) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC. thomas.carl@hotmail.com
2) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC. alondra.ens@outlook.com
3) Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC. nadia.bonuma@ufsc.br
4) Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC. pedro.chaffe@ufsc.br

a vulnerabilidade a períodos de estiagem tornam os processos de escoamento superficial e subterrâneo difíceis de serem monitorados e estudados apenas por métodos diretos (Botes *et al.* (2003)). A utilização de modelos numéricos é uma boa alternativa para estudar a dinâmica das águas e pode servir de base para a elaboração de estratégias efetivas de monitoramento e gestão de recursos hídricos (Tundisi (2008); Le Phong *et al.* (2015)).

Modelos de fluxo de águas subterrâneas para aquíferos não confinados são ferramentas poderosas para o estudo da dinâmica das águas no subsolo com aplicação na determinação da variação espaço-temporal das áreas saturadas em bacias hidrográficas e na quantificação das parcelas de água que originam as vazões de base em rios (Potter e Gburek (1987); Carlotto *et al.* (2018)).

O objetivo deste trabalho foi determinar a variação temporal e espacial das áreas saturadas que favorecem a geração de escoamento de base em uma bacia de cabeceira pertencente à bacia da lagoa do Peri localizada na cidade de Florianópolis – SC (Figura 1). Utilizou-se um modelo bidimensional de fluxo de águas subterrâneas para aquíferos não confinados considerando a heterogeneidade do solo, cujo desenvolvimento e implementação computacional é apresentado por Carlotto *et al*. (2018). A simulação computacional foi iniciada assumindo a bacia em condição de total saturação para representar a variação espaço temporal das áreas saturadas em um período de estiagem de 10 dias. Os resultados proporcionaram a identificação das regiões que tendem a permanecer saturadas durante períodos secos de até 10 dias e permitem visualizar a variação espacial e do percentual de área saturada na bacia ao longo do tempo.

ÁREA DE ESTUDO

Criado em 1981, através da Lei nº 1.828/81, o parque Municipal da Lagoa do Peri é um dos principais ecossistemas em estágio de preservação e regeneração da Mata Atlântica original da Ilha de Santa Catarina, sendo uma das mais importantes Unidades de Conservação de Proteção Integral do Município de Florianópolis (Santos *et al.* (1989)). O parque também abriga o maior manancial de água doce da Ilha destacando-se como importante ecossistema de preservação da biodiversidade. Devido à dependência ambiental, social e econômica com a lagoa do Peri, há a necessidade urgente do entendimento da hidrodinâmica de sua bacia.

A área de estudo é uma bacia de cabeceira localizada na encosta nordeste da bacia hidrográfica da lagoa do Peri (Figura 1). Com uma área de 2,96ha, e declividade média de 38%, o solo é caracterizado como cambissolo moderadamente drenado com áreas rochosas e forte ondulação (EMBRAPA (2001)). A vegetação da bacia divide-se em Floresta Atlântica Média (64% da área) com grande heterogeneidade de espécies arbóreas (Sbroglia e Beltrame (2012)) e reflorestamento com a presença de pinus na parte superior da encosta (36% da área).

Segundo os critérios de Köppen, a classificação climática da região é do tipo Cfa (Clima Mesotérmico Úmido), sem estação seca e com verão quente. Situada na zona intermediária subtropical, pertence ao grupo mesotérmico úmido "C", com a temperatura média do mês mais frio sendo maior do que 3 °C e menor que 18 °C, e a temperatura média do mês mais quente superior a 22 °C (Santos *et al.* (1989)). A precipitação média anual é de 1850 mm (ANA (2005)).

A hidrografia da micro bacia é formada por rios efêmeros que desaguam em uma área plana permanentemente úmida. As vertentes caracterizam-se por apresentarem escoamento superficial fragmentado, havendo local onde o escoamento "desaparece" e locais onde ele "ressurge".

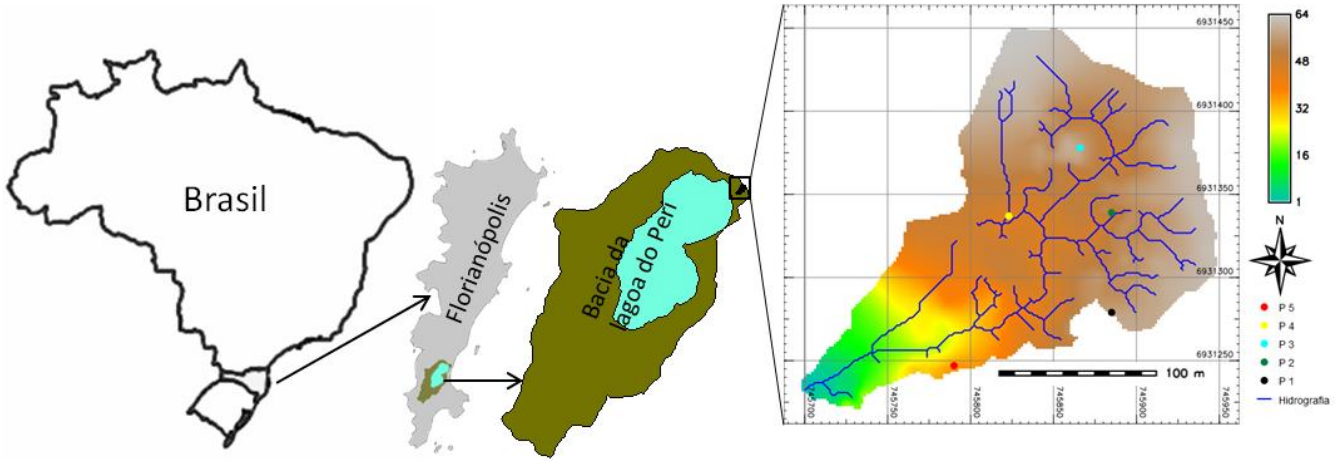

Figura 1 – Bacia da Lagoa do Peri. Em destaque está a bacia que define a área de estudo (na direita) e apresenta a localização dos poços (P1, P2, P3, P4 e P5). O esquema de cores representa as elevações do terreno.

MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho utilizamos uma implementação paralela em Unidade de Processamento Gráfico de Propósito Geral (*General Purpose Graphics Processing Unit* (GPGPU)) do modelo bidimensional de fluxo de águas subterrâneas para meios heterogêneos e anisotrópicos com método de diferenças finitas (Carlotto *et al.* (2018)). Consideramos uma condição de aquífero não confinado em que a espessura da camada saturada (b) é variável em função da carga hidráulica (h). A equação do fluxo de águas subterrâneas em 2D para aquífero não confinado que considera a heterogeneidade e anisotropia do solo pode ser escrita da seguinte forma:

$$\frac{\partial h}{\partial t} S_y = \frac{\partial}{\partial x}\left(T_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(T_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + W(x,y,t) \ , \qquad (1)$$

em que $T_{xx} = K_{xx} b(h)$ e $T_{yy} = K_{yy} b(h)$ são as transmissividades nas direções x e y respectivamente, K_{xx} e K_{yy} são as condutividades hidráulicas nas direções x e y respectivamente, h é carga hidráulica, $b(h)$ é a espessura saturada, W é o termo fonte ou sorvedouro e S_y é a vazão específica.

O modelo calcula a variação espaço – temporal de h na zona saturada acima da superfície confinante (C_{conf}) assumindo que quando h atinge valores maiores que a cota da superfície topográfica (C_{top}) o volume de água correspondente é extraído do sistema nos locais onde torna-se escoamento de base. Na Figura 2 são apresentadas as superfícies (C_{conf}, h, C_{top}) que definem o domínio computacional utilizado neste trabalho. A discretização espacial pelo método de diferenças finitas considerou um domínio computacional com 13159 células distribuídas no interior da bacia. Na solução numérica utilizou-se passo temporal horário (1h) para estimar a variação do nível freático no período de 10 dias.

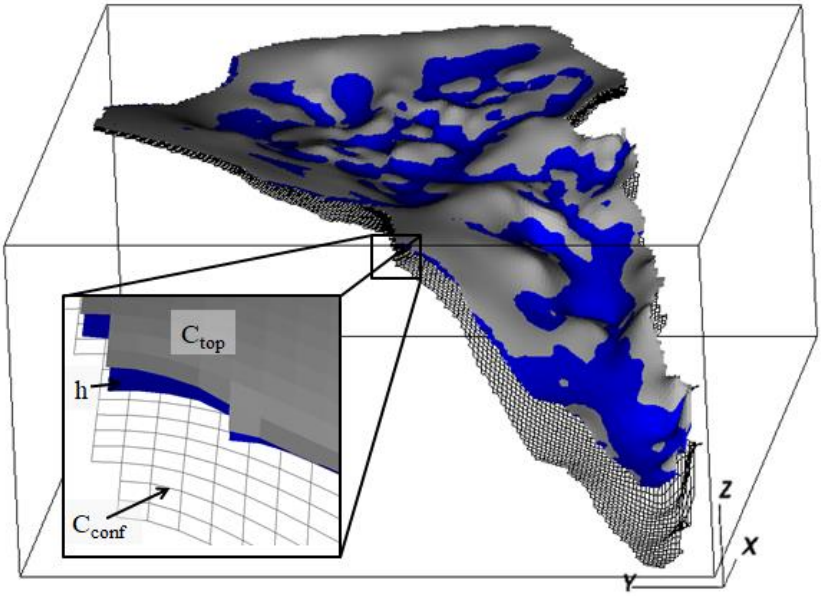

Figura 2 – Ilustração 3D das superfícies utilizadas no modelo de fluxo de águas subterrâneas.

O modelo digital de terreno (MDT) que define C_{top} foi obtido em campo por meio de levantamentos com estação total e posterior processamento em GRASS e ArcGIS de modo que o mapa resultante apresentou resolução espacial de 1,5m. As profundidades do solo foram determinadas a partir de um modelo matemático proposto por Saulnier *et al.* (1997) que realiza uma interpolação com base nas elevações do terreno e nas profundidades máxima e mínima do solo, de acordo com a Equação 2:

$$D_i = D_{\max} - \left(\frac{D_{\max} - D_{\min}}{el_{\max} - el_{\min}} \right) . \left(el_i - el_{\min} \right) , \qquad (2)$$

em que D_i é a profundidade do solo na célula i; el_i é a elevação na célula i; D_{max} e D_{min} são as profundidades máxima e mínima na bacia, respectivamente e el_{max} e el_{min} são as elevações máxima e mínima na bacia, respectivamente.

Na Figura 3 são apresentadas as características do solo na lagoa do Peri obtidas por Sens e Dalsasso (2007). Observa-se que em uma profundidade de 20 m o material predominante é argila que apresenta baixa permeabilidade. Portanto, neste estudo assumimos que a profundidade máxima

do solo é 20m para gerar a superfície da camada confinante usada no modelo de fluxo subterrâneo. Sens e Dalsasso (2007) obtiveram uma porosidade efetiva (η) igual a 20% em experimentos realizados na bacia da lagoa do Peri que está de acordo com valores comumente utilizados para porosidade efetiva de aquíferos compostos por material arenoso (Heath (1983)). Como os materiais predominantes no solo são areia e sedimento marinho, assumimos que não há água imóvel em quantidade significativa, de modo que a diferença entre η e S_y pode ser desprezada ($S_y \cong \eta$).

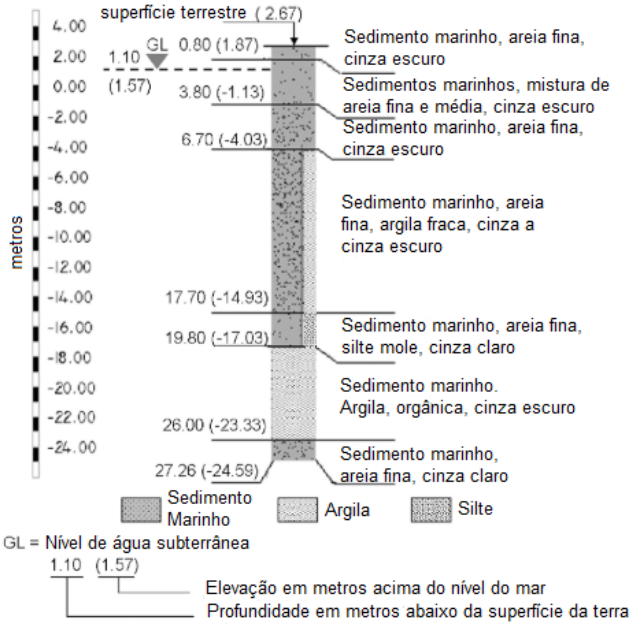

Figura 3 – Dados da geologia característica da bacia da lagoa do Peri. Adaptado de Sens e Dalsasso (2007).

Na Tabela 1 são apresentados os 5 poços instalados na área de estudo. As condutividades hidráulicas saturadas (K_{sat}) foram determinadas pelo método do poço invertido para diferentes profundidades do solo.

Tabela 1 – Poços instalados na área de estudo

Poços	**Profundidade (cm)**	**K_{sat} (m/h)**	**Profundidade do total (m)**
1	15	$8{,}21 \times 10^{-3}$	1,70
	90	$1{,}45 \times 10^{-3}$	
2	29	$14{,}49 \times 10^{-3}$	2,20
	68	$2{,}42 \times 10^{-3}$	
3	114	$10{,}14 \times 10^{-3}$	3,20
4	70	$28{,}01 \times 10^{-3}$	2,44
	128	$16{,}66 \times 10^{-3}$	
5	27	$4{,}11 \times 10^{-3}$	3,02
	42	$1{,}45 \times 10^{-3}$	

Na Figura 4 são mostradas as localizações dos poços e a distribuição espacial de K_{sat} em 4 diferentes zonas espaciais. Em cada poço K_{sat} foi determinado pela média dos valores nas

diferentes profundidades (Tabela 1). Para fazer a distribuição espacial assumiu-se K_{sat} correspondente ao poço situado em cada Zona como representativa para cada área. Na Zona 1, K_{sat} foi determinada pela média dos valores obtidos em P 1 e P 2.

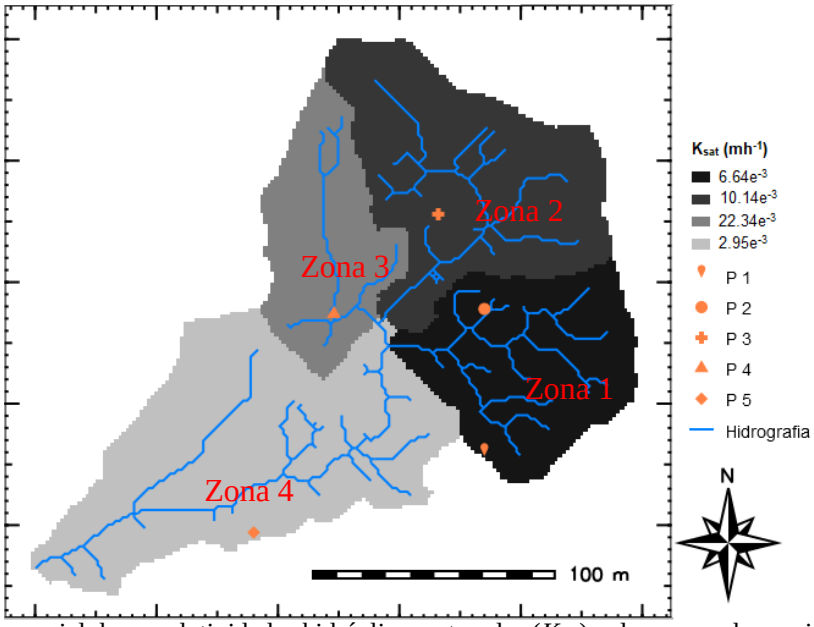

Figura 4 – Distribuição espacial das condutividades hidráulicas saturadas (K_{sat}) e dos poços de monitoramento.

RESULTADOS

A simulação do processo de escoamento de águas subterrâneas permitiu determinar a variação temporal e espacial das áreas saturadas que favorecem a geração de escoamento de base na área de estudo (Figura 1). A bacia é composta por rios efêmeros cujos pontos propícios a geração do escoamento de base foram identificados a partir da simulação computacional apresentada na Figura 5. A Figura 5 apresenta a variação do percentual de área saturada na bacia em função do tempo. Variações maiores do percentual de área saturada são verificadas durante os primeiros 4 dias de simulação. Esse comportamento demonstra o papel das transmissividades (T_{xx} e T_{yy}) no processo de escoamento subterrâneo que resulta do produto entre as condutividades hidráulicas e as espessuras da camada saturada ($b(h)$), cujo valor é maior no início e diminui à medida que o nível freático diminui.

A Figura 5 fornece uma forma para a interpretação física do processo que gera o fluxo de base na bacia. Pode-se notar que as porções inferiores da topografia da bacia recebem uma entrada de água de montante. À medida que o nível de saturação do solo é atingido, a água flui para os canais de drenagem da bacia, gerando escoamento de base. Devido ao fluxo contínuo de água subterrânea para os canais de drenagem, a espessura da camada saturada diminui. Como as transmissividades dependem da espessura da camada saturada, a profundidade do nível freático aumenta mais rapidamente nas regiões onde a camada saturada é mais espessa. À medida que o processo evolui, a

água flui para jusante até o nível freático atingir a profundidade da superfície confinante. Nesse ponto, o fluxo de água subterrânea cessa. Esta descrição do comportamento dos resultados com base nas simulações concorda com a física do problema. Isso indica que o modelo captura as características essenciais do fenômeno em estudo.

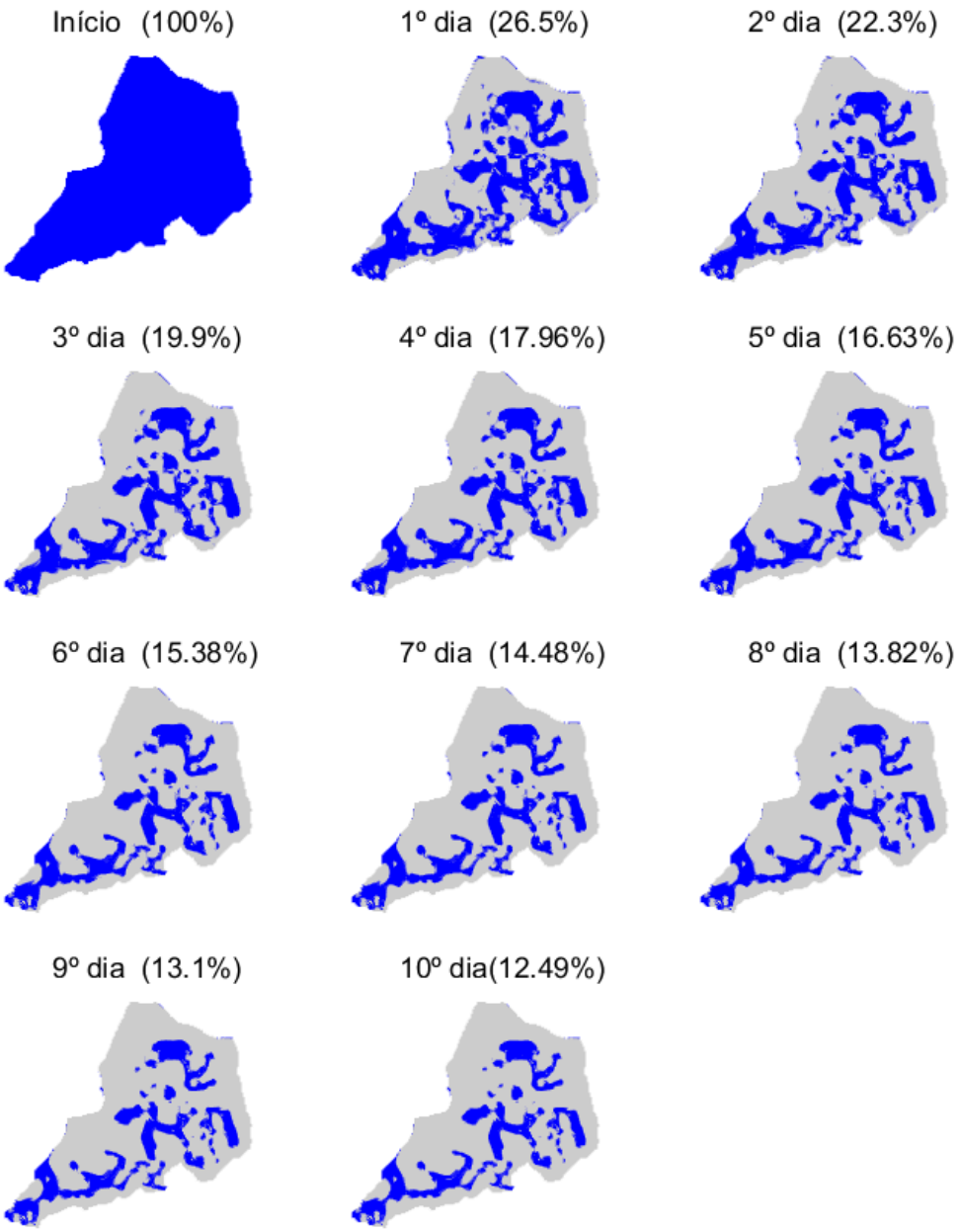

Figura 5 – Simulação da variação das áreas saturadas (percentuais de área saturada são mostrados entre parênteses) para um período de estiagem de 10 dias assumindo uma condição inicial de total saturação da bacia.

CONCLUSÕES

Neste trabalho determinamos a variação temporal e espacial das áreas saturadas que favorecem a geração de escoamento de base em uma bacia de rios efêmeros usando um modelo de fluxo de águas subterrâneas que considera a heterogeneidade do solo. A simulação computacional

foi iniciada assumindo a bacia em condição de total saturação para representar a variação espaço-temporal das áreas saturadas em um período de estiagem 10 dias. Os resultados proporcionaram uma forma de interpretação física do processo que gera o fluxo de base na bacia permitindo a visualização da variação das áreas saturadas e consequentemente a identificação dos locais propícios à geração de escoamento de base na bacia. Esta abordagem mostrou-se adequada para um estudo simplificado de determinação da variação das áreas saturadas propícias para a geração de escoamento de base em bacias hidrográficas com pouca disponibilidade de dados de campo.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao CNPq pela bolsa de estudos (doutorado) do primeiro autor sob o número 168003 / 2018-0 e pelo financiamento recebido do projeto universal do MCTIC/ CNPq/Universal-2014. Também agradecemos a FAPESC pela bolsa de estudos (mestrado) do segundo autor.

REFERÊNCIAS

ANA (2005). *Disponibilidade e Demandas de Recursos Hídricos no Brasil.* ,Rio de Janeiro .

BOTES, A.; HENDERSON, J.; NAKALE, T.; et al. (2003). *Ephemeral rivers and their development : testing an approach to basin management committees on the Kuiseb River , Namibia.* Physics and Chemistry of the Earth, v. 28, p. 853–858.

CARLOTTO, T.; DA SILVA, R. V.; GRZYBOWSKI, J. M. V. (2018). *A GPGPU-accelerated implementation of groundwater flow model in unconfined aquifers for heterogeneous and anisotropic media.* Environmental Modelling and Software, v. 101, p. 64–72. Elsevier Ltd. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.12.004>.

EMBRAPA. (2001). *Mapa de Solos do Brasil.* Rio de Janeiro: IBGE.

SENS M. L.; DALSASSO R. L. (2007). *"Bank filtration in margins of reservoirs and rivers as an efficient technology to treat the water supply", in Reservoir and River Basin Management: Exchange and Experiences from Brazil, Portugal and Germany*. Org. por Gunkel, G. e Carmo Sobral, M. Universitätsverlag der TU Berlin, pp. 253 - 264.

HEATH, R. C. (1983). *Basic Ground-Water Hydrology*. Reston,Virginia: U.S.Geological Survey.

LE PHONG, V. V.; KUMAR, P.; VALOCCHI, A. J.; DANG, H.-V. (2015). *GPU-based high-performance computing for integrated surface–sub-surface flow modeling*. Environmental Modelling & Software, v. 73, p. 1–13. Elsevier Ltd. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364815215300207>. .

POTTER, S. T.; GBUREK, W. J. (1987). *Seepage Face Simulation Using PLASM*. Groundwater, v.

25, n. 6, p. 722–732. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1745-6584.1987.tb02214.x>. .

SANTOS, G. F. DOS; SILVA, J. T. N.; MENDONÇA, M.; VEADO, R. W. (1989). *Análise Ambiental da Lagoa do Peri*. Geosul, Florianópolis.

SAULNIER, G. M.; BEVEN, K.; OBLED, C. (1997). *Including spatially variable effective soil depths in TOPMODEL*. Journal of Hydrology, v. 202, n. 1–4, p. 158–172.

SBROGLIA, R. M.; BELTRAME, V. (2012). *O zoneamento , conflitos e recategorização do parque municipal da lagoa do peri , florianópolis / SC.* , p. 5–18.

TUNDISI, J. G. (2008). *Recursos hídricos no futuro: problemas e soluções*. Estudos Avançados, v. 22, n. 63, p. 7–16. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/ea/v22n63/v22n63a02.pdf>. .