

IDENTIFICAÇÃO DAS ÁREAS SATURADAS NA BACIA DO RIO CASCAVEL, REGIÃO SUL DO BRASIL, POR MEIO DE MONITORAMENTO E MODELAGEM

Suellen Chemim de Almeida e Leandro Redin Vestena

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo identificar as áreas saturadas mínimas e máximas na Bacia do rio Cascavel em Guarapuava, região Sul do Brasil, por meio de monitoramento e modelagem da dinâmica do processo chuva-vazão. O modelo hidrológico semi-distribuído utilizado foi o TOPMODEL. No processo de calibração e validação do modelo foram utilizados dados horários. O índice de eficiência do modelo foi de 0,80 na calibração e de 0,58 na validação. O índice topográfico

da bacia do Cascavel apresentou valores até 23,7, sendo que os valores de índice topográfico correspondente às áreas saturadas variaram de 23,7 a 8,1. As áreas saturadas variaram entre 10,4% (mínima) e 30,1% (máxima) da área total da bacia hidrográfica. Pode-se afirmar que em sua maioria, as áreas saturadas na bacia do rio Cascavel correspondem às áreas de solos hidromórficos, fundos de vales, áreas ao redor dos cursos fluviais, e às áreas turfosas.

Introdução

A modelagem dos sistemas ambientais vem se destacando como uma importante ferramenta para estudos em bacias hidrográficas, pois são capazes de simplificar os fenômenos naturais, facilitando estudos ambientais e diminuindo custos de aplicabilidade. Na tentativa de compreender os sistemas naturais os estudos envolvendo questões hidrológicas estão sendo realizados com o objetivo de obter maior conhecimento sobre as ações do homem para com o meio onde vivem e tem sido de suma importância na sociedade atual. Uma das maneiras de compreender a dinâmica de uma bacia hidrográfica é por meio do monitoramento e da modelagem hidrológica, que permite simular a dinâmica de processos hidrológicos a partir de dados e parâmetros.

Na bacia do rio Cascavel (BRC), município de Guarapuava, sul do Brasil, eventos de inundações e

alagamentos são frequentes e estão relacionados a dinâmica das áreas saturadas, e a impactos da urbanização, decorrente principalmente da impermeabilização de áreas e da canalização de trechos fluviais.

A presença de grandes extensões de áreas com solos hidromórficos, como as turfeiras na BRC também geram preocupação quanto a sua ocupação, e a expansão da área urbana para esses locais, pois são áreas consideradas inapropriadas para moradia devido à pouca resistência dos seus solos, e a acumulação constante de água (Guarapuava, 1992). As áreas hidrológicamente sensíveis estão relacionadas diretamente às áreas na bacia que potencialmente podem ficar saturadas (Siefert e Santos, 2015), denominadas de áreas variáveis de afluência (AVAs) (Hewlett e Hibbert, 1967).

De acordo com Walter *et al.* (2000) a identificação das AVAs em uma bacia hidrográfica é importante, pois possibilita a

definição das áreas hidrológicamente sensíveis. As AVAs, em paisagens de clima úmido, caso da BRC, exercem papel principal na geração de escoamento superficial (Dunne e Black, 1970; Dunne *et al.*, 1975; Walter *et al.*, 2000); no transporte de sedimento e nutriente (Gburek *et al.*, 2000; Gburek *et al.*, 2002; Ocampo *et al.*, 2006; Srinivasan e McDowell, 2007); na qualidade da qualidade da água (Walter *et al.*, 2000; Ebel e Loague, 2006; Rode *et al.*, 2010); na erosão hídrica (Boll *et al.*, 2015); e na potencialização de inundações geradoras de desastres. Assim a identificação e preservação das AVAs tornam-se uma maneira eficaz de assegurar a qualidade ambiental.

O presente trabalho apresenta uma contribuição metodológica para a identificação e mapeamento das superfícies hidrológicamente sensíveis (áreas saturadas), validando a eficiência do TOPMODEL. Para tal, identificou-se as áreas saturadas na BRC, utilizando-se de dados

hidrológicos monitorados automaticamente em intervalos horários.

O modelo hidrológico utilizado foi o TOPMODEL (*Topography-Based Hydrological Model*). O TOPMODEL é um modelo hidrológico capaz de transformar chuva em vazão, utilizando relações físicas para representar os processos hidrológicos de uma bacia hidrográfica (Beven e Kirkby, 1979; Beven *et al.*, 1995). Este modelo considera que as características relacionadas à topografia exercem função dominante no processo de escoamento e armazenamento da água em uma bacia hidrográfica (BH), além de sua aplicação permitir conhecer a dinâmica de expansão e retração das áreas saturadas no tempo, por meio da simulação do processo chuva-vazão.

O TOPMODEL é um modelo chuva-vazão, semi-distribuído baseado na área variável de contribuição e fisicamente baseado (Beven, 1997). Ele é considerado semi-distribuído

PALAVRAS CLAVE / Áreas Hidrológicamente Sensíveis / Bacia Hidrográfica / Modelagem Hidrológica / Processo Chuva-Vazão / TOPMODEL /

Recebido: 12/05/2017. Modificado: 11/05/2020. Aceito: 14/05/2020.

Suellen Chemim de Almeida. Geógrafa e Mestre em Geografia, Universidade do Centro-Oeste (Unicentro), Brasil. Professora, Rede

Estadual de Ensino do Paraná, Brasil.

Leandro Redin Vestena. Geógrafo e Mestre em Geografia, Universidade Federal do Paraná,

Brasil. Doutor em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil. Professor, Unicentro, Brasil. Endereço: Departamento de

Geografia, Unicentro. Alameda Élio Antônio Dalla Vecchia, 838 - CEP 85040-167 - Bairro Vila Carli, Guarapuava - PR, Brasil. e-mail: lvestena@unicentro.br.

IDENTIFICATION OF SATURATED AREAS IN THE CASCAVEL RIVER CATCHMENT, SOUTH OF BRAZIL, THROUGH MONITORING AND MODELLING

Suellen Chemim de Almeida and Leandro Redin Vestena

SUMMARY

The objective of this study was to identify minimum and maximum saturated areas in the Cascavel River catchment in Guarapuava, South region of Brazil, through monitoring and modeling of the rainfall-runoff process dynamics. The semi-distributed hydrological model used was TOPMODEL. Hourly data were used during the process of calibration and validation of the model. The efficiency index of the model was 0.80 in calibration and 0.58 in validation. The topographic index of Cascavel Riv-

er catchment presented values up to 23.7, and topographic index values corresponding to the saturated areas ranged from 23.7 to 8.1. Saturated areas varied between 10.4% (minimum) and 30.1% (maximum) of the total area of the river basin. It is possible to state that the saturated areas in the Cascavel River catchment correspond to areas of hydromorphic soils, valley floors, areas around river courses and peat areas. Tobala seeds were oleopro-

IDENTIFICACIÓN DE LAS ÁREAS SATURADAS EN LA CUENCA DEL RÍO CASCAVEL, SUR DEL BRASIL, POR MEDIO DE MONITOREO Y MODELADO

Suellen Chemim de Almeida y Leandro Redin Vestena

RESUMEN

Este trabajo tuvo como objetivo identificar las áreas saturadas mínimas y máximas en la cuenca del río Cascavel en Guarapuava, región Sur de Brasil, por medio de monitoreo y modelado de la dinámica del proceso lluvia-caudal. El modelo hidrológico semi distribuido utilizado fue el TOPMODEL. En el proceso de calibración y validación del modelo se utilizaron datos horarios. El índice de eficiencia del modelo fue de 0,80 en la calibración y de 0,58 en la validación. El índice topográfico de

la cuenca del Cascavel presentó valores hasta 23,7, siendo que los valores de índices topográficos correspondientes a las áreas saturadas variaron de 23,7 a 8,1. Las áreas saturadas oscilaron entre el 10,4% (mínimo) y el 30,1% (máximo) del área total de la cuenca hidrográfica. Se puede afirmar que, en su mayoría, las áreas saturadas en la cuenca del río Cascavel corresponden a las áreas de suelos hidromórficos, fondos de valles, áreas alrededor de los cursos fluviales y las áreas turbosas.

porque apenas os parâmetros relacionados à topografia são distribuídos, enquanto os demais são considerados constantes, é um modelo de média exigência quanto à entrada de dados, e apresenta como dados de saída o escoamento e às áreas saturadas.

A escolha do modelo TOPMODEL se deu por haver na BRC grandes áreas de banhados e turfas, onde o escoamento é por saturação, apesar de 35,82% do uso do solo na BRC ser urbano (Gomes, 2014). O TOPMODEL, por representar o escoamento superficial por saturação, não é indicado para áreas urbanas onde o escoamento predominante é por excedente da infiltração.

Neste contexto, conhecer às áreas saturadas na BRC se torna importante por essas áreas serem capazes de reter e armazenar água na bacia, proporcionando uma resposta hidrológica chuvavazão mais lenta. Assim, o padrão espacial das AVAs possui

um papel importante no planejamento do uso, conservação e preservação ambiental.

Materiais e Métodos

Área de estudo

A área de trabalho compreende a bacia do rio Cascavel (BRC), localizada no município de Guarapuava, a qual está inserida na região Centro-Sul do estado do Paraná, Sul do Brasil, no Terceiro Planalto Paranaense ou Planalto de Guarapuava (Maack, 1981). A localização geográfica da BRC está compreendida entre os 25°18'03" e 25°26'19"S e os 51°24'49" e 51°32'07"O (Figura 1). A BRC possuiu área 81,03km², sendo o rio Cascavel tributário da bacia do Rio Jordão, que deságua na bacia do Rio Iguaçu, afluente do Rio Paraná.

O clima na BRC é considerado predominantemente subtropical mesotérmico úmido,



Figura 1. Localização da BRC. Fonte: Atlas Geográfico Escolar – IBGE (2004). Elaboração: BERTOTTI L.G. (2008).

com verões frescos e invernos moderados. A temperatura média anual é de 17°C. No inverno são comuns as geadas, principalmente entre os meses de junho a setembro. A pluviosidade média anual é de 1.960mm, com precipitações médias mensais >100mm, sendo os meses mais chuvosos outubro e janeiro, e os menos chuvosos, agosto e julho. De modo geral, as chuvas apresentam-se bem distribuídas, sem presença de uma estação seca definida (Thomaz e Vestena, 2003).

Os principais solos encontrados na BRC são os do tipo solos orgânicos Organossolos Háplicos, os Nitossolos Brunos, os Neossolos Litólicos e os Latossolos Brunos (Guarapuava, 1992; Mineropar, 2006; Embrapa, 2008). Os solos do tipo orgânicos podem ser observados com maiores detalhes da parte central a na parte sul da BRC, que corresponde à área urbana de Guarapuava.

Nos solos orgânicos da BRC tem-se a presença de turfas, caracterizada pelo assentamento direto sobre o substrato rochoso pouco decomposto, com espessura de 0,5m a 3,00 metros. No rio Cascavel registrou-se turfas com maiores espessuras ao longo da planície de inundação, na porção sudoeste da área da BRC (Guarapuava, 1992).

A região de turfas é considerada como de difícil manejo, pois os solos orgânicos predominantes nestas áreas são solos saturados que apresentam nível freático aflorantes ou rasos, e, além disso, são áreas sujeitas a inundações. Quando drenados esses solos tendem a sofrer alterações em seu volume original por retração, greteamento ou pastilhamento, e quando submetidos à secagem, perdem a capacidade de reabsorver a água, formando pequenos torrões porosos, endurecidos e de baixa resistência (Guarapuava, 1992).

Na BRC, o uso e ocupação do solo caracteriza-se por áreas construídas (35,8%) vegetação rasteira e cultura (26,7%), vegetação arbóreo-arbustiva (19,6%), solo exposto (9,1%) e

áreas úmidas (8,8%) (Gomes, 2014).

Procedimentos metodológicos e dados utilizados

Os materiais cartográficos utilizados foram às cartas topográficas analógicas Guarapuava - Folha SG.22-V-D-III-3 (MI-2838/3) e Guarapuava 0 - Folha SG.22-V-D-II-4 (MI-2837/4), na escala de 1:50.000 (DSG, 1980); e dados da base cartográfica da Prefeitura Municipal de Guarapuava, em meio digital; mais especificamente, a hidrografia, os pontos cotados e as curvas de nível (equidistância das curvas de nível: 1m) na escala de 1:12.500, provenientes de levantamento aerofotogramétrico realizado em 1996, cedidos pelo Centro de Estudos e Planejamento Urbano de Guarapuava (CEPLUG).

Os dados meteorológicos diários de temperatura do ar (°C), umidade relativa média do ar (%), insolação total (h), e velocidade do vento acumulada (km·h⁻¹), da estação agrometeorológica de Guarapuava (código 02551010) monitorada pelo Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR) e localizada a 25°21'S e 51°30'O, a 1.020m de altitude, foram utilizados para a estimativa da evapotranspiração potencial diária (ETp) diária, pelo método de Penman modificado, como proposto por Doorenbos e Pruitt (1977), no período de 2011 a 2012. A obtenção dos dados horários de evapotranspiração deu-se utilizando-se do coeficiente de ponderação proposto por Mine (1998).

Os dados pluviométricos e fluviométricos usados na simulação do processo chuva-vazão foram obtidos por meio do monitoramento de uma estação automática, localizada a 51°30'31"O e 25° 24'2"S, em uma altitude de 1.007m, na porção inferior da BRC, próximo a foz do rio Cascavel, no rio Jordão. A área de estudo compreende a área da BRC drenada no ponto de monitoramento fluviométrico. Os dados monitorados foram a chuva e o nível de água no canal fluvial

em intervalo horários, no período de junho de 2011 a maio de 2012. Os dados de vazão foram obtidos a partir da curva-chave da seção fluvial.

A versão (97.01) do TOPMODEL foi empregada para a simulação dos processos chuva-vazão e obtenção das áreas saturadas, utilizando-se de dados hidrológicos horários, precipitação (P), evapotranspiração potencial (ETp) e vazão observada (Q), e dados topográficos.

A base conceitual do modelo TOPMODEL pode ser encontrada nos trabalhos de Beven et. al (1995), Mine e Clarke (1996), Hornberger *et al.* (1998) e Beven (2001). Os principais componentes do modelo são: o armazenamento e escoamento de zona não saturada, o armazenamento e escoamento de zona saturada, e a propagação de escoamento na sub-bacia.

O TOPMODEL considera as seguintes hipóteses. H1: a dinâmica da zona saturada pode ser obtida por sucessivas representações de estados uniformes (*steady-state*); H2: O gradiente hidráulico da zona saturada é igual à declividade local do terreno (tan B); H3: a distribuição da transmissividade com a profundidade do solo ocorre segundo uma função exponencial; e H4: no intervalo de tempo existe homogeneidade espacial da taxa de recarga que contribui para a área saturada.

A vazão no canal fluvial é dada pela soma do escoamento subsuperficial da encosta e do escoamento superficial das áreas saturadas (Eq. 1):

$$q_i = q_b + q_s \quad (1)$$

onde q_i : escoamento total (m³·s⁻¹·m⁻²)= vazão (m³·s⁻¹)/área(m²), q_b : escoamento subsuperficial (m·s⁻¹), e q_s : escoamento superficial (m·s⁻¹).

O TOPMODEL utiliza a distribuição do índice topográfico IT como um índice de similaridade hidrológica, dado pela Eq. 2:

$$IT = \ln \left(\frac{a_i}{\tan B_i} \right) \quad (2)$$

na qual a_i : relação entre a área de contribuição e a unidade de contorno (m²·m⁻¹), e $\tan \beta_i$: gradiente subterrâneo, sendo igual à declividade da superfície da encosta (m·m⁻¹).

Os dados topográficos foram utilizados para obtenção do IT da BRC, com resolução de 5×5m. Neste procedimento utilizou-se do software GRASS GIS (*Geographic Resources Analysis Support System*) versão 6.4.3, a qual possui uma plataforma direta com o TOPMODEL.

Na aplicação do TOPMODEL, os valores dos parâmetros calibrados mantiveram-se inalterados durante todo o processo de modelagem, sendo que um parâmetro possui o mesmo valor calculado para todos os intervalos de tempo, o que não significa que este não possa sofrer variações espacialmente.

Os parâmetros foram calibrados de modo semiautomático, no próprio modelo, utilizando-se do método de Monte Carlo, sendo eles: a função da transmissividade exponencial (m), o logaritmo natural de transmissividade do solo saturado (ln(T₀)), o armazenamento máximo de água na zona das raízes (S_{r,max}), o déficit de armazenamento inicial na zona das raízes (S_{r,mit}), e a velocidade de propagação do escoamento no canal (Ch_{vel}).

O conjunto de dados hidrológicos monitorados foi dividido em duas partes, sendo uma delas usada na calibração e outra na validação. Os dados selecionados para a calibração do TOPMODEL foram os compreendidos entre 18/06/2011 a 18/12/2011, totalizando 4.400 dados horários, e para a validação de 19/12/2011 a 23/05/2012, totalizando 3.768 dados horários. O TOPMODEL nas simulações estimou às áreas saturadas na BRC para cada intervalo de tempo horário. Às áreas saturadas expandem-se e retraem-se nos ciclos de deflúvio.

A eficiência e a qualidade das simulações foram avaliadas por funções-objetivo. A análise da qualidade da simulação foi observada pela concordância

entre a vazão observada e a vazão simulada. As funções-objetivo escolhidas para verificação das simulações foram o coeficiente de eficiência (COE) (Nash e Sutcliffe, 1970) e de determinação (R^2). Os coeficientes indicam que quanto melhor for o ajuste entre o conjunto de valores, mais próximo de 1 é o valor do COE. Para Iorgulescu e Jordan (1994), Mine e Clarke (1996) e Santos e Kobiyama (2008), os valores de $COE \geq 0,7$ indicam alta eficiência no ajuste do modelo.

Às áreas saturadas simuladas na BRC foram validadas por meio de observações sistemáticas e pontuais, em campo, a partir de características do relevo (fundo de vale, várzea alagável, pouca declividade), solo (com sinais de hidromorfismo) e vegetação (presença de macrófitas aquáticas), que indicavam condição de saturação, permanente ou esporádica.

Resultados e Discussão

Processo chuva-vazão

O IT calculado para a BRC mostrou grande similaridade com a topografia da bacia e, de modo geral, representou de forma satisfatória as características geomorfológicas, onde os maiores valores estão associados a rede de drenagem e a depressões existentes no terreno, e os menores a regiões com declividade mais acentuada. Na BRC, os valores de IT predominantes estão entre 4 e 11.

O TOPMODEL no processo de calibração, apresentou bons índices de relação entre a vazão observada e calculada, com coeficiente $COE = 0,80$ e $R^2 = 0,8765$. Na Tabela I são apresentados os valores de cada parâmetro obtidos no processo de calibração.

Os valores dos parâmetros calibrados do TOPMODEL mostraram-se coerentes as grandezas físicas reais que representam e com valores estimados em outros estudos no Brasil, em bacias hidrográficas com características semelhantes

TABELA I
VALORES FINAIS DOS PARÂMETROS OBTIDOS NO PROCESSO DE CALIBRAÇÃO

Parâmetro	Valor	Unidade
m - Função da transmissividade exponencial	0,100	m
$\ln(T_0)$ - Logaritmo natural de transmissividade do solo saturado	0,082	m^2/h
SrMax - Armazenamento máximo de água na zona das raízes	0,022	m
SrInit - Déficit de armazenamento inicial na zona das raízes	0,089	m
ChVel - Velocidade de propagação do escoamento no canal	763,67	m/h

à da BRC (Varella e Campana, 2000; Ferreira, 2004; Siefert e Santos, 2015). Dentre os parâmetros, o $\ln(T_0)$, apresentou grande sensibilidade. Para Ferreira (2004), este parâmetro tem forte interação com a transmissividade (m), e qualquer alteração neste altera a resposta do $\ln(T_0)$. Enquanto, o parâmetro SrMax apresentou pouca sensibilidade.

A Figura 2 apresenta o hietograma e os hidrogramas da vazão observada e simulada na BRC, na calibração (Figura 2a) e validação (Figura 2b) do TOPMODEL.

Na simulação para a calibração do modelo, o fator de eficiência COE foi de 0,80, e na simulação para a validação de 0,58. Enquanto, o coeficiente de correlação (R^2) entre as vazões observadas e calculadas na calibração foi de 0,8765, e na validação de 0,7465. Apesar de ter apresentado um COE na validação de 0,58, de modo geral, verificou-se que o modelo simulou de modo satisfatório as vazões.

Áreas saturadas na bacia do rio Cascavel

Às áreas saturadas simuladas mínimas e máximas para a BRC, estão representadas na Figura 3. O índice topográfico (IT) das áreas saturadas apresentou valores superiores a 9,4 nas áreas de saturação mínima, e superiores a 8,1 na de saturação máxima. Esses valores são menores que os valores encontrados em Siefert e Santos (2015), que buscou definir um limite de sensibilidade hidrológica para a bacia do Rio Pequeno, Paraná, onde o índice topográfico das áreas hidrologicamente sensíveis variaram no intervalo de 9,3 a 13.

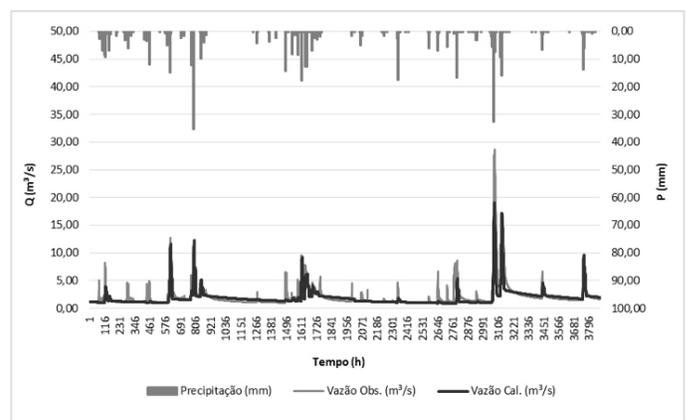
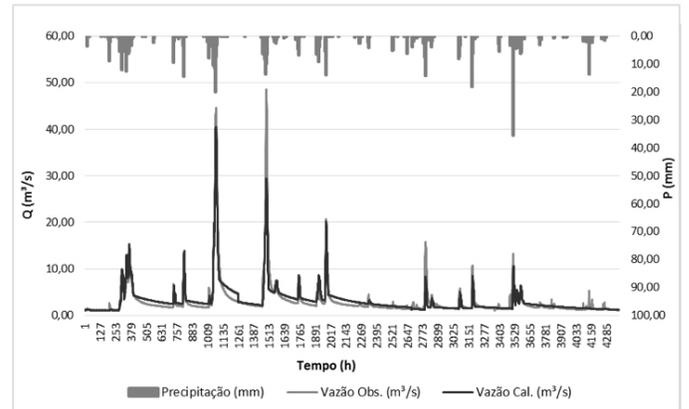


Figura 2. (a) Hidrograma de vazão observada e simulada na BRC, no processo de calibração do TOPMODEL, série de dados horários de 18/06/2011 a 18/12/2011 - 4.400h. (b) Hidrograma de vazão observada e simulada na BRC, no processo de validação do TOPMODEL, série de dados horários de 19/12/2011 a 23/05/2012 - 3.768h.

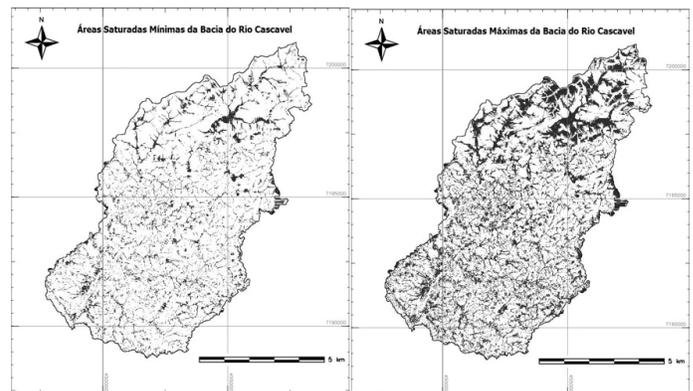


Figura 3. (a) Área saturada mínima (10,4%) e (b) máxima (30,1%) na BRC.

Às áreas saturadas máximas na BRC compreenderam 30,1% da área total da bacia, e ocorreu no dia 02/08/2011, às 11:00. Esse evento iniciou no dia 29/07/2011, com duração de 84h, e um volume de chuva de 201mm, sendo a vazão máxima de $44\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$. A precipitação anterior a esse período ocorreu no dia 21/07/2011, com 12h de duração, totalizando 41mm precipitados.

Às áreas saturadas mínimas abrangeram 10,4% da área da BRC. Os dados apontaram que às áreas saturadas mínimas corresponderam a menor vazão registrada na bacia, dentro do intervalo de dados simulado, que foi de $1,1\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$.

De modo geral, constatou-se coerência entre as AVAs simuladas e áreas saturadas na BRC. Na Figura 4 têm-se fotografias de AVAs mapeadas na BRC. Elas são caracterizadas por áreas alagadas; presença de vegetação hidrófila e herbácea, típica de regiões úmidas (Figuras 4a e 4f); banhados; solos hidromórficos (Figura 4c); e turfas (Figuras 4d e 4e).

Na BRC, as AVAs localizam-se nas depressões do terreno,

principalmente nas áreas de planícies, onde são encontradas a maioria das áreas de solos do tipo Organossolos Háplicos, e nas áreas correspondentes aos fundos de vales e os canais fluviais.

A dinâmica das áreas saturadas e das AVAs têm como principal característica a expansão e retração de seu perímetro e variam de acordo com o espaço, o tempo, as condições climáticas, a sazonalidade, e de acordo com os mecanismos de geração de escoamento, como o relevo, a formação pedogenética, o regime pluviométrico.

Para Dickinson e Whiteley (1970), às AVAs são mais propensas à geração de escoamento superficial por saturação, e podem apresentar uma variação de tamanho, em sua área total de 1 a 50%. Nas bacias hidrográficas, comumente as AVAs estão localizadas nas porções inferiores das vertentes, junto aos cursos fluviais, onde ocorre uma maior deposição dos materiais que são erodidos.

Desta forma, pode-se afirmar que conhecer às áreas

saturadas na BRC pode contribuir significativamente para estudos futuros que visem a conservação dos solos, da água e dos ambientes hidromórficos. Esses resultados podem ainda servir como ferramentas e auxiliarem estudos e discussões sobre a legislação ambiental, principalmente no que diz respeito às áreas de preservação permanente, bem como as práticas de manejo do solo, e o controle de qualidade da água, e de ocupação dessas áreas na BRC.

Conclusões

O TOPMODEL mostrou-se eficiente nas simulações do processo chuva-vazão na bacia do rio Cascavel (BRC). O bom desempenho é demonstrado pelas medidas de aderência entre as vazões observadas e simuladas.

Os índices topográficos na BRC predominantes ficaram entre 5 e 10, sendo que o valor correspondente às áreas saturadas variou no intervalo de 23,7 a 9,4 nas mínimas, e de 23,7 a 8,1 nas máximas, sendo esse

intervalo corresponde às áreas de maior potencial de saturação para esta bacia.

Na BRC pode-se notar que a maioria das áreas saturadas estão localizadas ao redor dos cursos fluviais e em áreas de relevo mais 'baixo', como os fundos de vales. Existe ainda algumas regiões na BRC, onde às áreas saturadas representam também as zonas de turfa, as quais são espaços onde existe uma grande quantidade de água, localizadas na porção norte, sudeste e sudoeste da bacia.

Às áreas saturadas na bacia variaram de 10,4% da área total da bacia (saturação mínima) a 30,1% (saturação máxima).

A aplicação do TOPMODEL permitiu de modo satisfatório a identificação e o mapeamento das áreas saturadas, representando a dinâmica de expansão e retração das áreas saturadas (AVAs) na BRC.

Embora o modelo TOPMODEL seja indicado para aplicação em bacias com relevo plano a suave ondulado e essencialmente rurais, obteve-se bons resultados nas simulações do processo chuva-vazão na BRC, com uso do solo misto, urbano e rural e relevo suave ondulado, uma vez que a mesma possui muitas áreas de sensibilidade hidrológica, como áreas de banhados e turfeiras, demonstrando-se ser o modelo uma ferramenta útil em estudos de cunho ambiental.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação Araucária e a CAPES pelo apoio financeiro.

REFERENCIAS

- Beven KJ, Kirkby MJ (1979) A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrol. Sci. J.* 24: 43-69.
- Beven K, Lamb R, Quinn P, Romanowicz R, Freer J (1995) TOPMODEL Em Singh VP (Ed.) *Computer Models of Watershed Hydrology*. Water Resources. Highland Ranch, CO, EEUU. pp. 627-668.
- Beven K (1997) TOPMODEL: A critique. *Hydrol. Proc.* 11: 1069-1085.

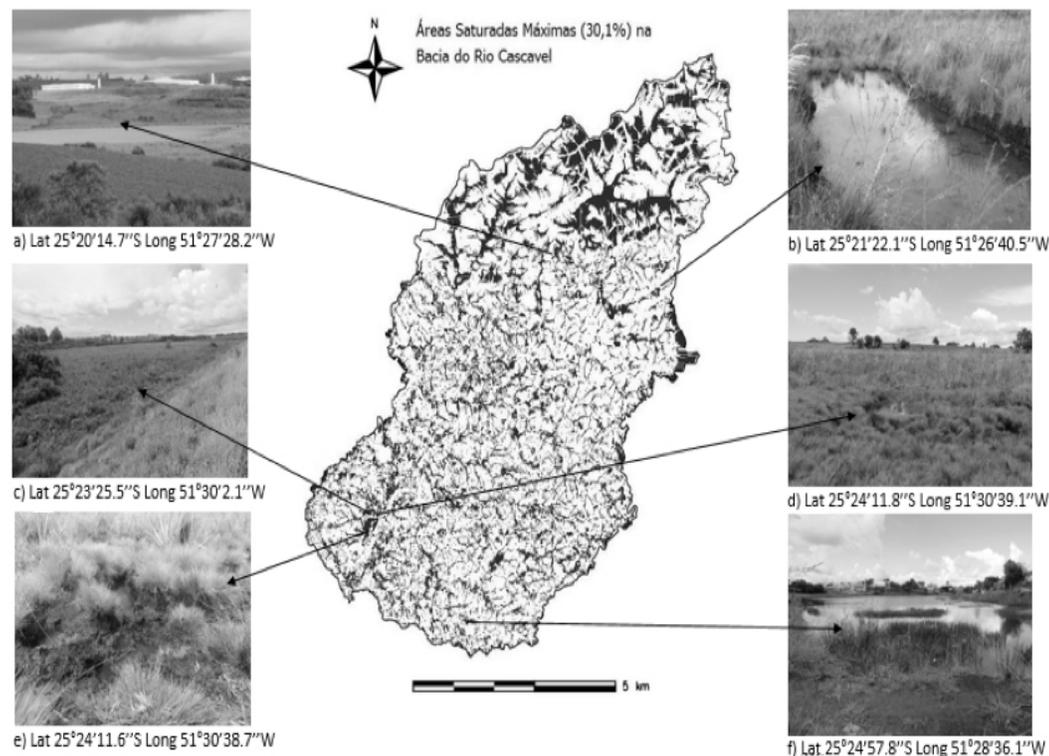


Figura 4. Reconhecimento de AVAs simuladas na BRC.

- Beven KJ (2001) *Rainfall-Runoff Modelling: The Primer*. Wiley. Chichester, RU. 360 pp.
- Boll J, Brooks ES, Crabtree B, Dun S, Steenhuis TS (2015) Variable source area hydrology modeling with the water erosion prediction project model. *J. Am. Water Resour. Assoc.* 51: 330-342.
- Dickinson WT, Whiteley H (1970) Watershed areas contributing to runoff. *Int. Assoc. Sci. Hydrol. Bull.* 96: 12-26.
- Doorenbos J, Pruitt WO (1977) *Crop Water Requirement. Irrigation and Drainage*. Paper 24. Food and Agriculture Organization. Rome, Italy. 144 pp.
- Dunne T, Black R (1970) An experimental investigation of runoff production in permeable soils. *Water Resour. Res.* 6: 478-490.
- Dunne T, Moore TR, Taylor CH (1975) Recognition and prediction of runoff-producing zones in humid regions. *Hydrol. Sci. Bull.* 20: 305-327.
- Ebel BA, Loague K (2006) Physics-based hydrologic-response simulation: Seeing through the fog of equifinality. *Hydrol. Proc.* 20: 2887-2900.
- Embrapa (2006) *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. 2ª ed. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Rio de Janeiro, Brasil. 286 pp.
- Embrapa (2008) *Mapa de solos Estado do Paraná: legenda atualizada*. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Rio de Janeiro, Brasil. 74 pp.
- Ferreira L (2004) *Simulação Hidrológica Utilizando o Modelo TOPMODEL em Bacias Rurais*. Estudo de Caso na Bacia do Ribeirão dos Marins – Seção Monjolinho – SP. Tese. Universidade Estadual de Campinas. Brasil. 205 pp.
- Gburek WJ, Sharpley AN, Heatwaite L, Folmar GJ (2000) Phosphorus management at the watershed scale: a modification of the phosphorus index. *J. Environ. Qual.* 29: 130-144.
- Gburek WJ, Drungil CC, Srinivasan MS, Needelman BA, Woodward DE (2002) Variable-source-area controls on phosphorus transport: Bridging the gap between research and design. *J. Soil Water Conserv.* 57: 534-543.
- Gomes ES (2014) *A Dinâmica Hidrológica Fluvial em Bacias Hidrográficas com Diferentes Taxas de Impermeabilização do Solo em Guarapuava/PR*. Tese. Universidade Estadual do Centro-Oeste. Brasil. 170 pp.
- Guarapuava (1992) *Geologia de Planejamento: Caracterização d Meio Físico da Área Urbana de Guarapuava*. Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano do Município de Guarapuava, Convênio Mineropar-Famepar, Prefeitura de Guarapuava. Brasil. 92 pp.
- Hewlett JD, Hibbert AR (1967) Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas. In Sopper WE, Lull HW (Eds.) *Forest Hydrology*. Pergamon Press. New York, EUA. pp. 275-290.
- Hornberger GM, Raffensperger JP, Wiberg PL, Eshleman KN (1998) *Elements of Physical Hydrology*. Johns Hopkins University Press. Baltimore, MD, EUA. 392 pp.
- Iorgulescu I, Jordan JP (1994) Validation of TOPMODEL on a small Swiss catchment. *J. Hydrol.* 159: 255-273.
- Maack R (1981) *Geografia Física do Estado do Paraná*. 2ª ed. Olympio. Curitiba, Brasil: 450 pp.
- Mine MRM (1998) *Método Determinístico para Minimizar o Conflito entre Gerar Energia e Controlar Cheias*. Tese. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Brasil. 261 pp.
- Mine MRM, Clarke RT (1996) O uso do TOPMODEL em condições brasileiras: resultado preliminar. *Rev. Bras. Recurs. Hídric.* 1: 89-106.
- Nash JE, Sutcliffe JV (1970) River flow forecasting through conceptual models I: A discussion of principles. *J. Hydrol.* 10: 282-290.
- Ocampo CJ, Sivapalan M, Oldham C (2006) Hydrological connectivity of upland-riparian zones in agricultural catchments: Implications for runoff generation and nitrate transport. *J. Hydrol.* 331: 643-658.
- Rode M, Arhonditsis G, Balin D, Kebede T, Krysanova V, Van Griensven A, Van der Zee SETM (2010) New challenges in integrated water quality modeling. *Hydrol. Proc.* 24: 3447-3461.
- Santos I, Kobiyama M (2008) Aplicação do TOPMODEL para determinação de áreas saturadas da bacia do rio Pequeno, São José dos Pinhais, PR, Brasil. *Amibi-Agua* 3: 77-89.
- Siefert CAC, Santos I (2015). Identificação de áreas hidrológicamente sensíveis por meio de modelagem hidrológica e da distribuição espacial de solos e vegetação em ambientes hidro-mórficos. *Soc. Natur.* 27: 141-155.
- Srinivasan MS, McDowell RW (2007) Hydrological approaches to the delineation of critical-source areas of runoff. *New Zeal. J. Agric. Res.* 50: 249-265.
- Thomaz EL, Vestena LR (2003) *Aspectos Climáticos de Guarapuava-PR*. UNICENTRO. Guarapuava, Brasil. 106 pp.
- Varella RF, Campana NA (2000) Simulação matemática do processo de transformação de chuva em vazão: estudo do modelo TOPMODEL. *Rev. Bras. Recurs. Hídric.* 5(4): 121-139.
- Walter MT, Walter MF, Brooks ES, Steenhuis TS, Boll J, Weiler KR (2000) Hydrologically sensitive areas: variable source area hydrology implications for water quality risk assessment. *J. Soil Water Conserv.* 55: 277-284.