Simulação hidrológica com o Topography-Based Hydrological Model (TOPMODEL) a partir da correção de erro de altitude em MDS ASTER-GDEM

Alex de Lima Teodoro da Penha¹ Alfredo Ribeiro Neto²

¹ Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, Departamento de Engenharia Civil, Recife, PE
² Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, Departamento de Engenharia Civil, Recife, PE alexdapenha@gmail.com, ribeiront@gmail.com

ABSTRACT - Hydrological studies of watersheds require lifting and obtaining information relating to the physical characteristics that influence the processes related to the hydrological cycle. The results of hydrologic simulations of distributed models rain-flow depend on the reliability of Digital Surface Models (DSM), or Digital Terrain Models (DTM). Some of these free DSM require altitude errors are eventually corrected, as occurs with data from the ASTER GDEM, they appear nonexistent elevations and depressions in the ground. Within this context, the simulation models of rain-flow, as in the Topography-Based Hydrological Model (TOPMODEL), can have unreliable results consistent with the morphology of the terrain, they depend on the quality of geometric DSM. In this article are discussed methods for correcting errors in altitude of DSM of ASTER, by applying the filter *fill* of ArcGIS, and selective replacement using conditional function, switching pixels with errors by the number of nearest neighbor in SRTM resampled.

Palavras-chave: Remote Sensing, Sensoriamento Remoto, TOPMODEL.

1 INTRODUÇÃO

Estudos hidrológicos de bacias hidrográficas exigem o levantamento e obtenção de informações referentes às características físicas que influenciam os processos relacionados ao ciclo hidrológico. A qualidade da distribuição espacial dessas características é um aspecto que deve ser considerado nos estudos para melhor representação desses processos. Os resultados das simulações hidrológicas de modelos distribuídos de chuva-vazão, e seus cálculos intermediários, como a geração de escoamento superficial, por exemplo, são diretamente influenciados por aspectos geométricos da topografia da bacia, ou seja, pelo Modelo Digital de Superfície (MDS), ou Modelo Digital de Terreno (MDT) local. No entanto, muitas vezes, alguns destes modelos, disponíveis gratuitamente, apresentam erros em sua geração, como é o caso do ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) GDEM (*Global Digital Elevation Model*), gerando depressões e elevações incompatíveis com a morfologia real no terreno.

A correção de erros de altitude em modelos digitais foi motivada pelos resultados iniciais encontrados na diferença altimétrica entre os dados dos sensores ASTER e SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) para as bacias em estudo. Erros de altitude em MDS influenciam diretamente os resultados hidrológicos do Modelo Hidrológico de Base Topográfica (TOPMODEL) tanto em bacias menores como no caso em estudo do Rio Gameleira quanto em bacias maiores, como a do Rio Tapacurá, alterando, por exemplo, a direção de fluxo de drenagem das chuvas e, em alguns casos, a própria delimitação da bacia.

Diversos trabalhos enfatizam o efeito da incerteza dos dados de entrada como um fator de alto impacto na simulação hidrológica. Alguns enfatizam a dificuldade devido à variabilidade espacial da precipitação (XAVIER, 2002; Troutman (1982ab,1983); Krajewski et al. (1991); Kuczera e Williams (1992); entre outros), outros enfatizam a variabilidade de uso do solo; além de estudos sobre o impacto da resolução espacial do modelo digital de terreno (MDT) para a obtenção do índice topográfico (Zhang e Montgomery (1994), Wolock (1995), Wolock e Price (1994) e Wolock e McCabe(1995)). Este trabalho enfatiza a correção de erros de altitude tendo em vista a análise de sensibilidade para o estudo da incerteza geométrica dos dados de entrada oriundos de sensoriamento remoto, especificamente os dados de relevo.

No artigo foram testados alguns métodos que podem ser adotados para a correção de erros de altitude em MDS, como o ASTER GDEM, tornando-o mais consistente e confiável para aplicações hidrológicas. Para isso, foram executados testes com dois tipos de correções, um utilizando somente o ASTER e outro substituindo os erros pelos dados SRTM. No primeiro foram aplicados filtros disponíveis em *software* comercial diretamente ao ASTER. O segundo fez uso da correção da área com erro de altitude pela substituição por outro dado altimétrico disponível, neste caso o SRTM, de forma direta.

2 ÁREA DE ESTUDO

O estudo é realizado para a bacia do riacho Gameleira, localizada no rio Tapacurá, uma subbacia do rio Capibaribe, que está localizada na Zona da Mata de Pernambuco. O rio Tapacurá possui 72,6 km de extensão e a bacia contribuinte possui uma área de drenagem de 470,5 km². A microbacia do riacho Gameleira possui uma área de drenagem de 17 km², e está situada numa área de transição entre a zona da mata e o semi-árido. Na Figura 2, apresenta-se a localização da bacia do riacho Gameleira no interior da bacia do Tapacurá e a localização dessa última no Estado de Pernambuco.



Figura 1. Localização da bacia do riacho Gameleira.

3 TOPOGRAPHY-BASED HYDROLOGICAL MODEL (TOPMODEL)

O modelo hidrológico de base topográfica (*Topography-based Hydrological Model* - TOPMODEL) foi desenvolvido inicialmente por Mike J. Kirkby e Keith J. Beven (Beven e Kirkby, 1979). O TOPMODEL é um modelo hidrológico chuva-vazão semi-distribuído, possuindo apenas os dados altimétricos de entrada na forma geoespacial, por meio de um Modelo Digital de Superfície (MDS) ou Modelo Digital de Terreno (MDT), enquanto os demais parâmetros são constantes para toda a bacia. Daí a importância de se usar dados altimétricos confiáveis.

No TOPMODEL adota-se algumas hipóteses iniciais que simplificam o modelo:

- O fluxo subsuperficial segue a Lei de Darcy;

- A dinâmica do lençol freático é aproximada por uma sucessão de estados estacionários (steady state);

- O gradiente do potencial hidráulico é invariante ao longo do tempo, sendo aproximado da declividade do terreno local;

- A transmissividade da camada de solo saturado é uma função exponencial do déficit hídrico de saturação S(t) ao longo do perfil de solo (Beven e Kirkby, 1979)

- A recarga de cada pixel em um período de tempo é a medida da taxa de recarga média em um tempo t (definido como constante para a bacia).

O TOPMODEL é uma função da variabilidade espacial de um índice hidrológico de similaridade (matriz $[\kappa] = ln\left(\frac{[a]}{[tan\beta]}\right)$, no qual [a] é a matriz da área de drenagem acumulada específica à montante (*specific catchment area*) e $[tan\beta]$ é a matriz de declividade do terreno local) e da média de água armazenada na bacia em função de seu déficit $(\overline{S(t)})$ em um determinado período de tempo t. A base do modelo está na possibilidade de armazenamento de cada pixel em cada variação de tempo, realizado por reservatórios individuais interligados internamente à bacia hidrográfica. Por isso, é capaz de calcular o valor do déficit de água armazenada em cada pixel representativo da superfície terrestre, pela matriz $[S(t)] = -m. ln\left(\frac{\overline{r(t)}.[a]}{T_0.[tan\beta]}\right)$, no qual $\overline{r(t)}$ é a recarga de cada pixel em um período de tempo, medida da taxa de recarga média em um tempo t (definido como constante para a bacia), T_0 é a *transmissividade horizontal média* de cada tipo do solo quando saturado na superfície. E m é o déficit do perfil de decaimento exponencial da transmissividade horizontal. Além disso, é capaz de simular séries temporais de vazão, apesar do

Parâmetro	Descrição				
K ₀	Coeficiente de condutividade hidráulica saturada do solo.				
т	Perfil do decaimento exponencial da transmissividade lateral com déficit.	[m]			
S _{RMax}	Nível máximo de armazenamento do reservatório da zona de raízes.				
Inter	Taxa máxima da camada d'água perdida por interceptação e evapotranspiração.	$[m. s^{-1}]$			
d_0	Valor máximo do déficit (Saulnier e Datin, 2004).	[m]			

Tabela 1 - Parâmetros de entrada do TOPMODEL.

O cálculo do Déficit de Saturação Local, principal idéia do TOPMODEL, permite uma série de outras suposições e hipóteses fundamentais do modelo, como o cálculo do índice topográfico (puro) ou do solo-topográfico (completo), médio e local; déficit de saturação médio; equação clássica do TOPMODEL; condição de saturação; e índice crítico de saturação. Todos diretamente influenciados por aspectos geométricos da topografia da bacia, e, portanto, do MDS. Fazer uso de um MDS confiável parece ser especialmente importante neste caso.

4 METODOLOGIA

pequeno número de parâmetros.

O foco dos métodos testados a seguir está na correção de eventuais erros de altitude nos dados digitais de relevo, que geram picos e/ou depressões incompatíveis com as feições reais encontradas no terreno. No caso do ASTER, seus dados brutos em algumas regiões são disponibilizados com grandes diferenças geométricas, quando comparado com os dados SRTM. Este último, por se tratar de um modelo digital adquirido a partir de dados de radar interferométrico, apesar de ter pior resolução espacial, qualitativamente é mais confiável globalmente para a caracterização da morfologia do terreno.

Quaisquer dados hidrológicos gerados a partir do ASTER, como a delimitação dos limites da bacia hidrográfica, a geração de curvas de nível, a geração da direção do fluxo de drenagem, ou a geração das linhas de drenagem, por exemplo, se mostram ineficientes do ponto de vista da

qualidade geométrica das informações geoespaciais. Por este motivo foram realizados testes para sua correção: por meio da aplicação de filtros ao ASTER GDEM; e pela correção de algumas áreas a partir do SRTM, gerando um dado misto, mais consistente e livre de erros de altitude.

Os métodos de correção foram feitos usando os softwares ArcGIS, ERDAS Imagine, ou implementados no MatLab e detalhados em Penha (2012). Penha (2012) discute métodos para correção de erros de altitude do MDS do ASTER, no qual descreve o pré-processamento de dados de relevo, detalhando: comparações entre as altimetrias ASTER e SRTM; correção de erros de altitudes por filtros, com testes para eliminação de depressões, eliminação de picos, e correção por substituição seletiva.

5 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

Uma vez testados os métodos para correção de erros de altitude dos dados do ASTER GDEM, faz-se necessário os testes estatísticos a partir dos resultados das simulações hidrológicas a partir de cada uma das metodologias testadas. Para estas simulações são usados os parâmetros K_0 , m, S_{RMax} , *Inter* e d_0 (Tabela 1 -) constantes e são simulados dois eventos simultaneamente com período de tempo de 15 minutos. Nas figuras a seguir são apresentados os resultados dos métodos para correção de erros de altitude do MDS do ASTER. Foram simulados o SRTM original (90m), o ASTER original (30m), o ASTER GDEM filtrado depressões (30m), ASTER GDEM filtrado picos (30m), ASTER corrigido pelo SRTM reamostrado para 30m pelo método *Nearest Neighbor* com teto de corte de 1 *x EMQ*, que obteve o melhor resultado na correção seletiva.

0.4











Figura 6. ASTER GDEM corrigido (30m), 1 x EMQ - SRTM (30m, Nearest Neighbor)

Tabela 1 - Estatistica das siniulações na Daela do Nio Gandelena.							
	EVENTO Nash	Nash	R2	Nash_rac(G)	Volume (G)		
		1 (dish		Bias QBar	Bias QMax		
	Global	.824	.947	.879	.051		
SRTM original (90m)	Evento 1	.836	.935	16.075%	28.338%		
	Evento 2	.808	.947	31.470%	11.352%		
	Global	.629	.936	.807	.105		
ASTER original (30m)	Evento 1	.676	.916	23.435%	38.801%		
	Evento 2	.572	.948	44.438%	25.216%		
ASTED CDEM filtrada dannagañag	Global	.323	.939	.717	.180		
ASTER ODEM Intrado depressões	Evento 1	.388	.919	32.844%	60.291%		
(5011)	Evento 2	.243	.950	55.317%	42.376%		
ASTED CDEM filtrado picos	Global	.296	.939	.709	.186		
ASTER ODEM Illuado picos $(20m)$	Evento 1	.367	.919	33.436%	61.685%		
(5011)	Evento 2	.210	.950	56.300%	44.148%		
ASTER GDEM corrigido (30m),	Global	.620	.932	.800	.109		
1 x EMQ - SRTM (30m, Nearest	Evento 1	.659	.909	24.184%	38.626%		
Neighbor)	Evento 2	.573	.947	44.779%	23.604%		

Tabela 1 - Estatística das simulações na Bacia do Rio Gameleira

6 CONCLUSÕES

Os erros de altitude dos MDS de uso livre foram avaliados neste artigo quando aplicados a simulação com o Modelo Hidrológico de Base Topográfica (TOPMODEL), e também foram realizados testes de correção.

A correção de alguns erros com a aplicação do filtro *Fill* ao modelo ASTER no *software* ArcGIS, chegou a bons resultados para as depressões, o que não ocorreu com os picos. O uso da ferramenta *fill* deve ser cuidadoso pois elimina indiscriminadamente tanto os erros de altitude, como as depressões reais existentes no terreno, portanto, seu resultado não pode ser considerado confiável para representar a morfologia da bacia hidrográfica. Além disso, as correções não são controladas e o método não eliminou os erros de maior magnitude entre os modelos ASTER e SRTM.

Para as correções seletivas, por substituição direta, verifica-se que a substituição do ASTER pelo SRTM de 30m, reamostrado por *Cubic Convolution* e corte em 3xEMQ, apresentou o pior resultado, visto que a região corrigida se mantém com "degraus" altimétricos, incompatíveis com a resolução espacial final desejada. A substituição pelo SRTM reamostrado por *Nearest Neighbor* e teto de corte de 1xEMQ, apresentou o melhor resultado estatístico, porém, é pior do ponto de vista qualitativo que o *Bicubic Spline*, segundo melhor resultado estatístico. Além disso, para todos os resultados finais mistos houve uma melhora significativa no EMQ. Na ligação entre a área corrigida e a original é possível perceber "degraus", provavelmente devido ao deslocamento relativo entre o ASTER e o SRTM e pela diferença do tipo de aquisição de cada dado, ótico e radar.

Nos resultados das simulações com os MDS oriundos de cada um dos métodos verificou-se que o resultado final foi similar, sem nenhuma diferença significativa na bacia do riacho Gameleira. Os mesmos testes precisam ser realizados para a bacia do rio Tapacurá, que apresenta o MDS com inconsistências maiores e em mais quantidade.

Referências bibliográficas

ASTER. Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer. Nasa: Jet Propulsion Laboratory. Site. Disponível em < http://ASTERweb.jpl.nasa.gov/>. Acesso: 28 setembro 2011.

BEVEN KJ, KIRKBY MJ. A physically based variable contributing area model of basin hydrology. Hydrological Science Bulletin 24: 43–69. 1979.

- BEVEN, K J. Spatially Distributed Modelling: Conceptual Approach to Runoff Prediction. In D.S. Bowles and P.E. O'Connell (eds) Recent Advances in the Modelling of Hydrologic Systems, 373-387, Kluwer Academic. 1991.
- BEVEN, K. J. Hillslope runoff processes and flood frequency characteristics. In: ABRAHAMS, A. D. Hillslope Processes. Allen and Unwin, 1986a. p. 187-202.
- BEVEN, K. J. Kinematic subsurface stormflow. *Water Resources Research*, Washington, v. 15, n. 5, p. 1419-1424, 1981.
- BEVEN, K. J. Runoff production and flood frequency in catchments of order n: an alternative approach. In: GUPTA, V. K.; RODRIGUES-ITURBE, I.; WOOD, E. F. Scale Problems in Hydrology. Dordrecht: Reidel, 1986b. p. 107-131.
- BEVEN, K. J.; WOOD, E. F. Catchment geomorphology and the dynamics of runoff contributing areas. *Journal of Hydrology*, Amsterdam, v. 65, p. 139-158, 1983.
- BEVEN, KJ; LAMB, R; QUINN, P; ROMANOWICZ, R; FREER J. TOPMODEL. In Models of Watersheds Hydrology, Singh VP (ed.). Water Resources Publications: Colorido; chapter 18. 1995.
- CANDEIAS Ana Lúcia Bezerra. Aplicação da Morfologia Matemática à Análise de Imagens de Sensoriamento Remoto. Tese de Doutorado em Computação Aplicada no INPE, 1997.
- ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE (ESRI). ArcGIS 9.2 Desktop Help. Disponível em

">http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.2/index.cfm?TopicName=welcome>">http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.2/index.cfm?TopicName=welcome>">http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.2/index.cfm?TopicName=welcome>">http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.2/index.cfm?TopicName=welcome>">http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.2/index.cfm?TopicName=welcome>">http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.2/index.cfm?TopicName=welcome>">http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.2/index.cfm?TopicName=welcome>">http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.2/index.cfm?TopicName=welcome>">http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.2/index.cfm?TopicName=welcome>">http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.2/index.cfm?TopicName=welcome>">http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.2/index.cfm?TopicName=welcome>">http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.2/index.cfm?TopicName=welcome>">http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.2/index.cfm?TopicName=welcome>">http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.2/index.cfm?TopicName=welcome>">http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.2/index.cfm?TopicName=welcome>">http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.2/index.cfm?TopicName=welcome>">http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.2/index.cfm?TopicName=welcome>">http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.2/index.cfm?TopicName=welcome>">http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.2/index.cfm?TopicName=welcome>">http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.2/index.cfm?TopicName=welcome>">http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.2/index.cfm?TopicName=welcome>">http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.2/index.cfm?TopicName=welcome>">http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.2/index.cfm?TopicName=welcome>">http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.2/index.cfm?TopicName=welcome>">http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.2/index.cfm?TopicName=welcome>">http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.2/index.cfm?TopicName=welcome>">http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.2/index.cfm?TopicName=welcome>">http://webhelp.esri.c

- ERSDAC. **ASTER Global Digital Elevation Model (GDEM)**. Site. Disponível em < http://www.ersdac.or.jp/GDEM/E/2.html>. Acesso: 28 setembro 2011.
- KRAJEWSKI, W.F., LAKSHMI, V., GEORGAKAKOS, K.P. et al., "A Monte Carlo study of rainfall sampling effect on a distributed catchment model", Water Resources Research, 27, 1, 119-128, 1991.
- KUCZERA, G., WILLIAMS, B.J., "Effect of rainfall errors on accuracy of design flood estimates", Water Resources Research, 28,4,1145-1153, 1992.
- PENHA, A. de L. T. da e SILVA, D. C. da: CORREÇÃO DE ERRO DE ALTITUDE EM MDS ASTER-GDEM EM DELIMITAÇÃO DE BACIA HIDROGRÁFICA, IV Simpósio Bras. Ciências Geodésicas e Tecnol. da Geoinformação, 1–9, 2012.
- SAULNIER, G.-M. e DATIN, R.. Analytical solution to a bias in the TOPMODEL framework balance. Hydrological Processes. 18, 1195–1218 (2004). Published online 8 March 2004 in Wiley InterScience (www.interscience.wiley.com). DOI: 10.1002/hyp.1346, 2004.
- SAULNIER, G.-M. Information pédologique spatialisée et traitements topographiques améliorés dans la modélisation hydrologique par TOPMODEL. 1996. 275 f. Tese, Institut National Polytechnique de Grenoble, Grenoble França, 1996.
- SAULNIER, Georges-Marie, e CASTAINGS, William. TOPMODEL course. Universidade Federal de Pernambuco. 18 de Novembro, 2011
- SILVA, R. V.; KOBIYAMA, M. Estudo comparativo de três formulações do TOPMODEL na bacia do Rio Pequeno, São José dos Pinhais, PR. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 12, n. 2, p. 93-105, 2007b.
- SRTM. Shuttle Radar Topograph Mission. Site. Nasa: Jet Propulsion Laboratory. Disponível em < http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>. Acesso: 01 novembro 2011.
- TROUTMAN, B.M., "Errors and parameter estimation in precipitation-runoff modeling 2. Case study", Water Resources Research, 21, 8, 1214-1222, 1985b.
- TROUTMAN, B.M., "Runoff prediction errors and bias in parameter estimation induced by spatial variability of precipitation", Water Resources Research, 19,3,791-810, 1983.
- TULU, Mesay Daniel. **SRTM DEM Suitability in Runoff Studies**. Dissertação de Mestrado ITC. Holanda. 2005, p. 30.

- WOLOCK, D. M., McCABE Jr, G.J., "Comparison of single and multiple flow direction algorithms for computing topographic parameters in TOPMODEL", Water Resources Research, 31,5,1315-1324,1995.
- WOLOCK, D. M., PRICE, C.V., "Effects of digital elevation model map scale and data resolution on a topographic-based watershed model", Water Resources Research, 30, 11, 3041-3052, 1994.
- WOLOCK, D.M., "Effects of subbasin size on topographic characteristics and simulated flow paths in Sleepers River catchment, Vermont", Water Resources Research, 31, 8, 1989-1997, 1995.
- XAVIER, Luciano Nobrega Rodrigues. Análise da incerteza causada pela representação da precipitação no modelo Topmodel [Rio de Janeiro] 2002. VIII, 124 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Civil, 2002) Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 2002.
- ZHANG, W., MONTGOMERY, D.R., "Digital elevation model grid size, landscape representation, and hydrologic simulations", Water Resources Research, 30,4,1019-1028,1994.