



INFLUÊNCIA DA RESOLUÇÃO ESPACIAL DE MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO (MDEs) NO CÁLCULO E DISTRIBUIÇÃO DE ÍNDICES TOPOGRÁFICOS EM PEQUENAS BACIAS HIDROGRÁFICAS

Vítor de Oliveira Santos ¹
José Teixeira Filho ²

RESUMO

O Índice Topográfico (IT) é um elemento espacial que simula a propensão à saturação hídrica do solo de determinadas áreas de uma bacia hidrográfica. Esse produto é utilizado como um dos principais dados para a simulação hidrológica utilizando o modelo TOPMODEL (*Topography-based Hydrological Model*). Uma vez calculado a partir de modelos de elevação, como os MDEs, partiu-se do pressuposto de que, ao utilizar resoluções mais refinadas de MDEs, os resultados de ITs seriam mais detalhados e mais bem distribuídos nas áreas de estudo, possibilitando, conseqüentemente, uma modelagem hidrológica mais precisa. Para analisar o exposto, foram escolhidas duas bacias hidrográficas, denominadas de BH1 e BH2, com características naturais e antropogênicas distintas, localizadas nos municípios de Campinas e Jundiaí, respectivamente. Utilizando como base MDEs de diferentes resoluções nas duas bacias hidrográficas (12m, 20m, 30m e 45m para BH1 e 50m, 60m, 70m e 80m para BH2), os ITs foram calculados e submetidos à análise estatística que abrangeu elementos como valor máximo, valor mínimo, valor médio, *range*, desvio padrão, entre outros. Foi possível concluir, de fato, que a qualidade do IT é dependente da resolução espacial dos MDEs, assim como sugere a bibliografia consultada.

Palavras-chave: Hidrologia, Modelagem hidrológica, Índice Topográfico, Modelos de Elevação.

ABSTRACT

The Topographic Index (TI) is a spatial element that simulates the propensity to water saturation of the soil in certain areas of a watershed. This product is used as one of the main data for hydrological simulation using the TOPMODEL (Topography-based Hydrological Model). Once calculated from elevation models such as DEMs, it was assumed that, by using more refined DEM resolutions, the TI results would be more detailed and better distributed in the study areas, thus enabling more accurate hydrological modeling. To analyze this, two watersheds were chosen, named BH1 and BH2, with distinct natural and anthropogenic characteristics, located in the cities of Campinas and Jundiaí, respectively. Using as a basis DEMs of different resolutions in the two areas (12m, 20m, 30m and 45m for BH1 and 50m, 60m, 70m and 80m for BH2), the TIs were calculated and submitted to statistical analysis as maximum, minimum and mean values, range, standard deviation, among others. It was possible to conclude, in fact, that the TI quality is dependent on the spatial resolution of the DEMs, as suggested by the consulted bibliography.

¹ Doutorando em Geografia da Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP – SP, v164036@dac.unicamp.br

² Professor Doutor da Faculdade de Engenharia Agrícola – FEAGRI, UNICAMP, jose@feagri.unicamp.br



Keywords: Hydrology, Hydrological Modeling, Topographic Index, Elevation Models.

INTRODUÇÃO

Índice Topográfico (IT) é um elemento hidrogeomorfológico utilizado como um dos parâmetros distribuídos do modelo hidrológico TOPMODEL (*Topography-based Hydrological Model*). Desenvolvido inicialmente por Beven e Kirkby (1979), o TOPMODEL é um modelo de transformação de chuva-vazão baseado em processos físicos, porém com representação semidistribuída, ou seja, somente os parâmetros relacionados à topografia (o Modelo Digital de Elevação – MDE e o Índice Topográfico – IT), são distribuídos. Os demais parâmetros como a precipitação incidente e a transmissividade dos solos são constantes para toda a extensão das bacias hidrográficas modeladas. Essa característica faz com que, no TOPMODEL, a topografia seja considerada como informação de suma importância na geração do escoamento direto nas bacias hidrográficas.

O objetivo do trabalho é avaliar a influência que o uso de MDEs de diferentes resoluções espaciais incide sobre o cálculo e sobre a qualidade apresentada do Índice Topográfico, elemento fundamental para a execução da modelagem hidrológica utilizando o TOPMODEL. Partiu-se do pressuposto de que, ao utilizar resoluções mais refinadas de MDEs, os resultados de ITs seriam mais detalhados e mais bem distribuídos nas áreas de estudo, possibilitando, assim, uma modelagem hidrológica mais precisa.

Para isso, foram realizadas análises comparativas dos dados de MDEs com diferentes resoluções espaciais e análises estatísticas dos ITs calculados a partir desses modelos, para duas bacias hidrográficas distintas.

METODOLOGIA

Áreas de Estudo

O trabalho foi desenvolvido em duas bacias hidrográficas, em áreas distintas, que foram denominadas de BH1 e BH2. BH1, cuja ocupação de suas terras é majoritariamente caracterizada por plantio de cana-de-açúcar, está localizada no município de Campinas, estado de São Paulo, e possui uma área de 6,9 km². Por sua vez, BH2 é uma bacia hidrográfica experimental, com 14,3 km² de área, no município de Jundiaí/SP. BH2 está

localizada no interior da Serra do Japi (2.071 ha), um dos remanescentes de floresta nativa do bioma Mata Atlântica mais significativos do estado de São Paulo. A localização da BH1 e da BH2 pode ser verificada no mapa da Figura 1.

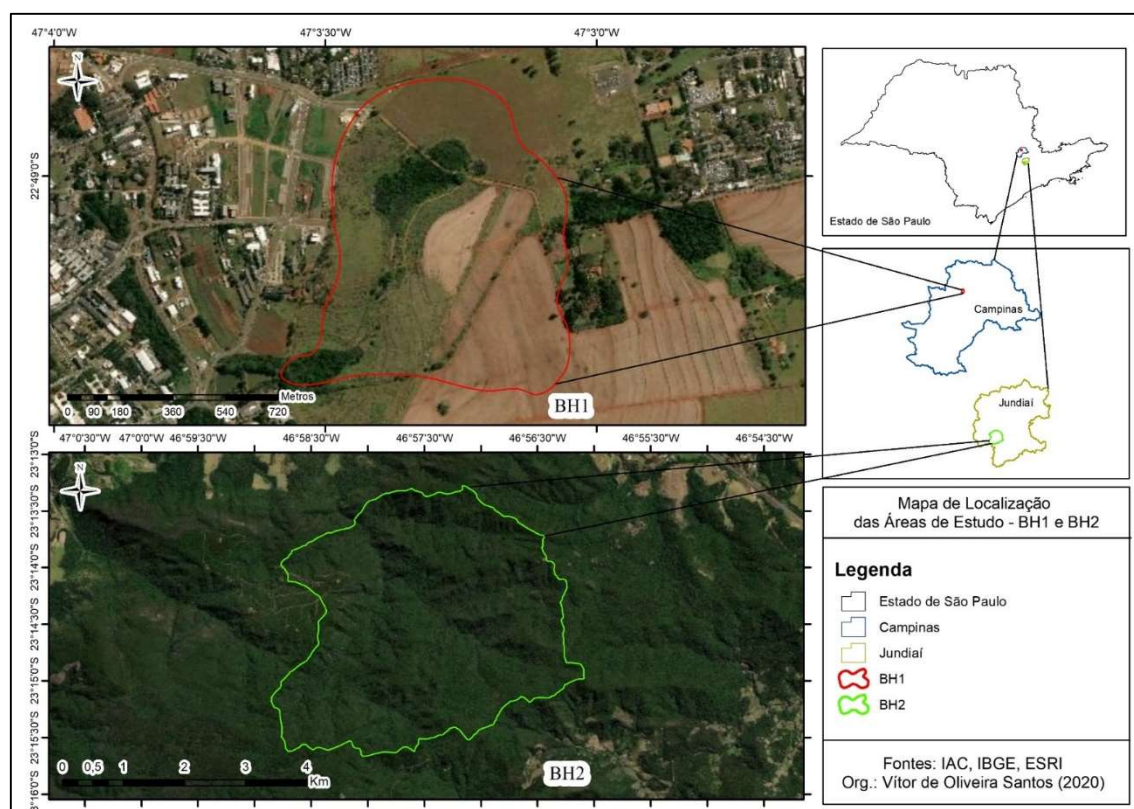


Figura 1. Mapa de localização das bacias BH1 e BH2, nos municípios de Campinas e Jundiaí, estado de SP.

Materiais e Métodos

Os MDEs foram construídos utilizando imagens do sensor Palsar, do satélite Advanced Land Observing Satellite – ALOS, de resolução espacial original de 12,5 metros. Os pixels dos arquivos rasters originais foram reamostrados gerando MDEs de quatro resoluções para BH1 (tamanho das células: 12x12m, 20x20m, 30x30m e 45x45m) e também quatro resoluções para BH2 (tamanho das células: 50x50m, 60x60m, 70x70m e 80x80m).

A diferença das resoluções espaciais utilizadas nas duas bacias hidrográficas se justifica devido ao tamanho das bacias hidrográficas e à limitação que o modelo TOPMODEL possui em conseguir simular bacias cujos dados matriciais não ultrapassem cem linhas e cem colunas. Portanto, aqui, esse limite foi respeitado.



Para o cálculo do Índice Topográfico foi utilizada a ferramenta “Raster Calculator” do software Arcgis 10.4, seguindo o seguinte roteiro, para ambas bacias hidrográficas:

- Cálculo da Direção de Fluxo (Flow Direction - FD);
- Cálculo da Acumulação de Fluxo (Flow Accumulation - FA);
- Cálculo da Declividade (slope);
- Declividade = (slope (MDE) * 1.570796) / 90;
- Tan_slp = conditional (slope > 0, tan(slope), 0.001);
- Fa_scaled = (fa + 1) * resolução do MDE
- IT = In (fa_scaled / tan_slp)

De posse dos ITs calculados para as duas bacias, foi realizada análise estatística desses resultados, considerando os seguintes parâmetros: valor de IT máximo, valor de IT mínimo, valor de IT médio, diferença entre o valor máximo e o valor mínimo (range), desvio padrão, variância, e número total de pixels (linhas x colunas).

REFERENCIAL TEÓRICO

O Índice Topográfico descreve o modo como a topografia controla a propensão de cada ponto da bacia hidrográfica em desenvolver condições de saturação, como, por exemplo, a propensão deste ponto para gerar escoamento superficial por saturação durante um evento de precipitação (BEVEN e KIRKBY, 1979).

Sabe-se que as bacias hidrográficas, devido suas heterogeneidades, apresentam diferentes valores de ITs ao longo de suas áreas de drenagem. Esses valores revelam, espacialmente, as áreas que possuem maior ou menor potencialidade para gerar escoamento superficial por saturação. Esse tipo de escoamento superficial também é conhecido como Dunniano, cuja teoria se encontra em Dunne (1979), e ocorre quando a capacidade de armazenamento de água no solo é excedida, isto é, após a saturação do solo em decorrência de precipitação (DUNNE, 1979).

Como contraponto ao mecanismo de geração de escoamento superficial Dunniano, cabe citar o mecanismo Hortoniano (HORTON 1933). A geração de escoamento Hortoniano é baseada na premissa de que, ao alcançar o solo, a água da chuva é segregada, onde parte dessa água é infiltrada e a outra parte esco superficialmente até chegar ao curso d'água. O escoamento em superfície, para Horton (1933), acontece



quando a capacidade de infiltração do solo é superada pela intensidade do evento de precipitação. Esse tipo de escoamento, por exceder a capacidade de infiltração, é considerado dominante em bacias onde o perfil do solo ou o uso na superfície da terra foram alterados radicalmente, à exemplo das áreas agrícolas, em regiões áridas ou semiáridas, onde há pouca presença de vegetação e em áreas urbanizadas, onde a superfície do solo é, em grande parte, impermeável, devido às construções e pavimentações (SANTOS, 2001).

Nas rotinas do TOPMODEL, o IT é determinado através de um algoritmo desenvolvido por Quinn et. al. (1995). Esse algoritmo calcula o valor da área de drenagem na parcela da encosta da bacia hidrográfica para cada célula, em função de informações obtidas por um MDT ou MDE, dimensão e declividade da parcela, além da direção do fluxo. Em cada célula, a água pode ter até nove posições, sendo que são possíveis oito direções de fluxo de água, quando se considera a movimentação da água de cada célula para sua adjacente. Na Figura 2, pode-se visualizar as possibilidades das direções de fluxo de cada célula para a sua adjacente. Tal possibilidade de direção de fluxo é definida pela declividade apresentada pela célula predominante.

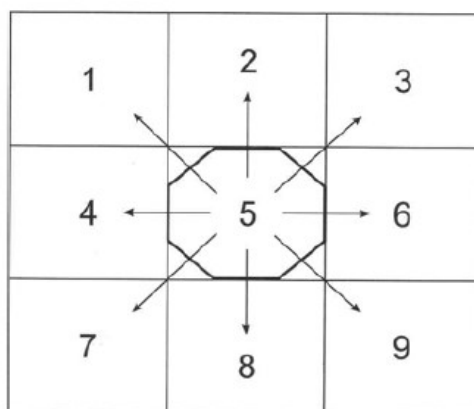


Figura 2. Esquema do algoritmo de múltiplas direções de fluxo. Fonte: Ferreira (2004).

Desse modo, quando as células apresentam o mesmo valor de IT, considera-se que elas possuem um comportamento hidrológico semelhante. Maiores valores de IT indicam maior probabilidade de acumulação de água, grande área de contribuição e baixa declividade, logo, podem estar associados às áreas localizadas em fundos de vales, base de encostas e próximas à canais de rios (SANTOS, 2011). Ao contrário, menores valores



de IT são encontrados, geralmente, em topos de morros, onde a área de contribuição da vertente é relativamente pequena, apresentando declividade mais alta (SANTOS, 2011).

Outro fator que pode interferir no resultado do cálculo dos ITs é a qualidade das informações contidas nos Modelos Digitais de Elevação – MDEs. Vaze et. al. (2010) apontam que a qualidade dos recursos topo-hidrológicos calculados a partir de MDEs são sensíveis à precisão e à resolução espacial dos modelos digitais utilizados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Considerando um dos pressupostos básicos do modelo TOPMODEL, de que a propensão que um ponto da bacia hidrográfica possui em desenvolver condições de saturação é proporcional aos valores do IT, essa análise teve como objetivo analisar o modo como a resolução espacial dos MDEs influencia na distribuição espacial dos ITs em BH1 e BH2. É de se supor, portanto, que, se a variabilidade da resolução espacial dos MDEs provoca mudanças nos cálculos dos ITs, haveria, concomitantemente, alterações relativas à dinâmica hidrogeomorfológica nesses locais.

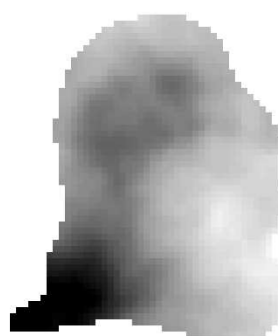
Para BH1, foram gerados ITs a partir de MDEs com resolução espacial de 12m, 20m, 30m e 45m. Em BH2, os ITs foram calculados com base em MDEs de 50m, 60m, 70m e 80m. Os valores mais refinados da resolução espacial foram escolhidos obedecendo a limitação do TOPMODEL em suportar, no máximo, matrizes com 100 linhas e 100 colunas. Como as áreas das bacias hidrográficas em estudo são diferentes, com BH2 – 14,3 km² sendo maior que BH1 – 6,9 km², logo, o menor valor aceitável de resolução espacial para BH2 (50m), foi maior do que para BH1 (12m). Os MDEs com as resoluções espaciais utilizadas para o cálculo do IT de BH1 e BH2 podem ser visualizados na Figura 3 (a) e (b), respectivamente.



A



MDE - 12 m
Máximo: 671,7 m
Mínimo: 614,1 m



MDE - 20 m
Máximo: 671,6 m
Mínimo: 614,1 m



MDE - 30 m
Máximo: 670,5 m
Mínimo: 614,1 m



MDE - 45 m
Máximo: 669,0 m
Mínimo: 614,8 m

B

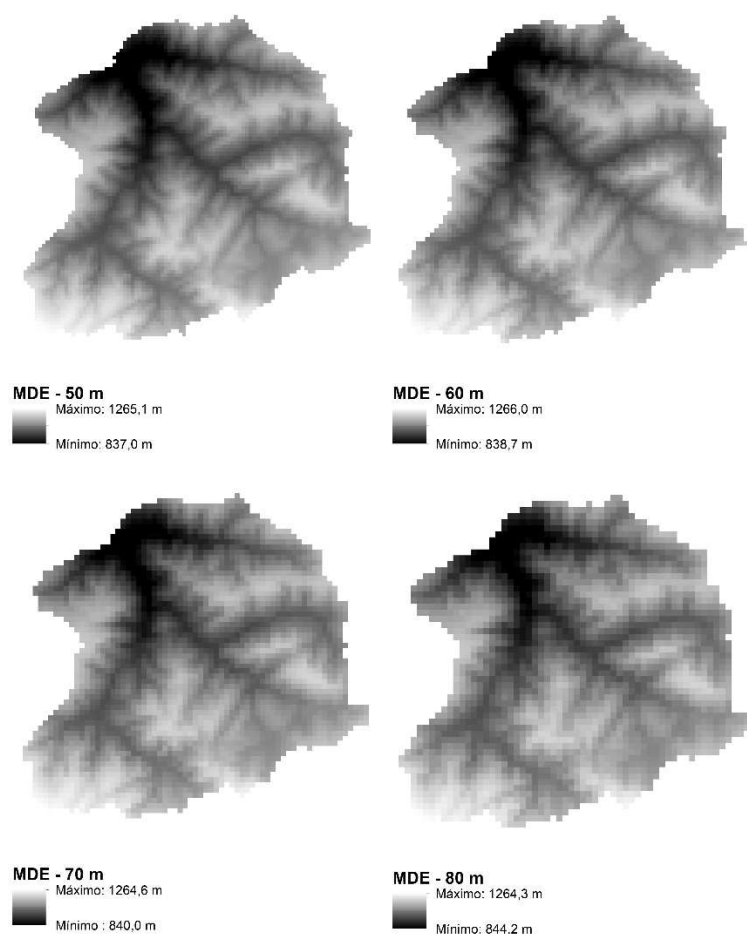


Figura 3. Modelos Digitais de Elevação de BH1 (A) e BH2 (B). Notar como, à medida em que se aumenta o tamanho dos pixels, há uma perda sistemática da resolução e da visualização dos aspectos terrestres da bacia.

Os MDEs produzidos para BH1 apontaram que a utilização de resoluções mais grosseiras, afetaram, de modo amplo a visualização dos aspectos terrestres nessa bacia. Contudo, os valores de altimetria máximos e mínimos calculados para as resoluções espaciais de 12 e 45 m tiveram pouca variabilidade. No MDE de 12 m, o valor máximo e mínimo foram de 671,7 e 614,0 m, respectivamente. Já no MDE de 45 m, o valor máximo e mínimo foi de 669,0 e 614,8 m.

Em BH2, por sua vez, apesar de se utilizar MDEs com resoluções mais grosseiras, devido ao tamanho da bacia hidrográfica (14,3 km²), apresentou menor sensibilidade visual ante ao aumento dos tamanhos dos pixels. Em contrapartida, os dados obtidos apontam que as altimetrias máximas pouco variaram entre os MDEs de 50 e 80 m,



atingindo a altitude de 1265,1 e 1264,3 m, respectivamente. As menores altimetrias variaram de modo mais evidente. No MDE de 50 m, a menor altimetria foi de 837 m, e no MDE de 80 m, 844 m.

Tendo em vista essa variabilidade dos aspectos terrestres sob o uso de diferentes resoluções espaciais dos MDEs, foram calculados os Índices Topográfico – ITs das bacias. Os dados estatísticos dos ITs para BH1 e BH2 podem ser visualizados na Tabela 1.

Estatísticas de IT em BH1	Parâmetros	IT – 12 m	IT – 20 m	IT – 30 m	IT – 45 m
	Mínimo	3,954	4,755	5,420	5,999
	Máximo	17,128	15,976	12,553	12,838
	Média	6,819	7,194	7,510	7,897
	Diferença entre o valor mínimo e o máximo (<i>range</i>)	13,174	10,556	7,133	6,839
	Desvio padrão	1,602	1,462	1,314	1,200
	Variância	2,566	2,137	1,727	1,440
	Nº de <i>pixels</i> (linhas x colunas)	76x90	46x54	30x36	20x24
Estatísticas de IT em BH2	Parâmetros	IT – 50 m	IT – 60 m	IT – 70 m	IT – 80 m
	Mínimo	4,101	4,364	4,598	4,828
	Máximo	14,708	15,484	13,737	14,156
	Média	6,255	6,446	6,604	6,776
	Diferença entre o valor mínimo e o máximo (<i>range</i>)	10,607	11,12	9,139	9,328
	Desvio padrão	1,653	1,627	1,552	1,580
	Variância	2,732	2,649	2,409	2,498
	Nº de <i>pixels</i> (linhas x colunas)	94x89	79x74	67x63	59x55

Tabela 1. Estatísticas dos valores do Índice Topográfico em BH1 e BH2. Os parâmetros analisados foram o valor mínimo, valor máximo, média, diferença entre o valor máximo e valor mínimo (*range*), desvio padrão e o coeficiente de determinação r^2 entre os valores da resolução espacial dos MDEs e dos ITs.

Os resultados das estatísticas apresentadas na Tabela 1 mostram que, em BH1, na medida em que a resolução dos MDE diminui, aumentando o tamanho da área dos pixels do arquivo raster, os valores mínimos de IT são superestimados, enquanto os valores máximos diminuem. Ainda em BH1, o IT oriundo do MDE de 12m apresentou um valor mínimo de 3,954 e um valor máximo de 17,128, obtendo, desse modo, o maior range



entre os valores de IT nessa bacia hidrográfica, 13,174. Em contrapartida, para o IT proveniente do MDE de 45m, o menor valor de IT encontrado foi de 5,999 e o maior valor, 12,838 (range de 6,839). Os valores médios também tenderam a aumentar, na medida em que se reduziu a resolução dos MDEs. O desvio padrão para cada resolução espacial de MDE testada demonstra que, quanto mais refinado for o tamanho do pixel, maior é a heterogeneidade dos valores de IT. Comparando o desvio padrão entre os ITs do MDE de 12m e os ITs de 45m, nota-se que o primeiro apresentou 1,602 e o segundo, 1,200. A análise da variância corrobora os resultados do desvio padrão, apresentando valores de 2,732 e 2,498 para os ITs de 12 e 45 m, respectivamente.

Quanto à BH2, a análise estatística demonstrou que os dados de IT apresentaram comportamento semelhante, relativamente, quando comparados aos valores amostrais de BH1. A resolução espacial mais refinada, 50m, gerou ITs que variaram entre 4,101 e 14,708, apresentando um range de 10,607. Por sua vez, para os ITs gerados a partir do MDE de 80m, o menor valor encontrado foi de 4,828 e o maior, 14,156 (range de 6,839). Os valores de IT de BH2 tiveram, todavia, um comportamento incomum: os valores de IT obtidos a partir do MDE de 60m mostraram um valor máximo maior do que a resolução mais refinada, de 50 m (15,484, em 60m e 14,708, em 50m). O desvio padrão apresentado para os ITs de 60m todavia, foi menor do que o apresentado pelos ITs de 50m (1,627 e 1,653, respectivamente), assim como a variância (2,649 – IT de 60 m e 2,732 – IT de 50 m). Já os dados de ITs de 80m apresentaram um desvio padrão de 1,580, e uma variância de 2,498, comprovando que, quanto menor for a resolução espacial do MDE, mais homogêneo serão os valores de IT calculados.

O comportamento demonstrado pelas estatísticas dos ITs em BH1 e BH2 pode ser verificado através da observação dos mapas de distribuição espacial dos ITs das bacias hidrográficas na Figura 4 e na Figura 5, respectivamente.

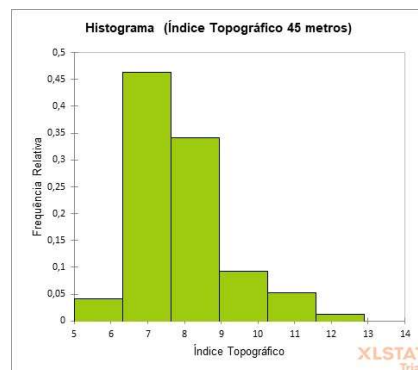
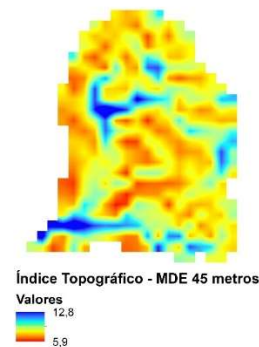
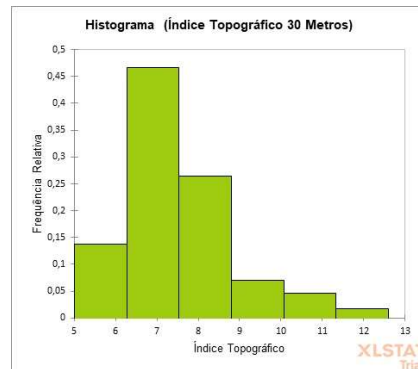
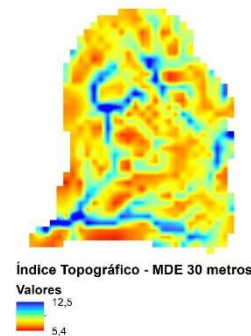
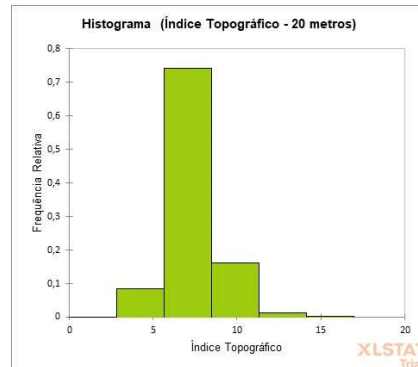
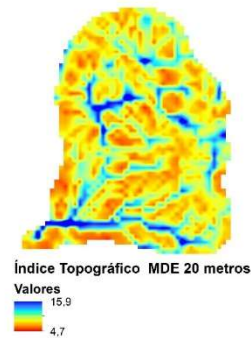
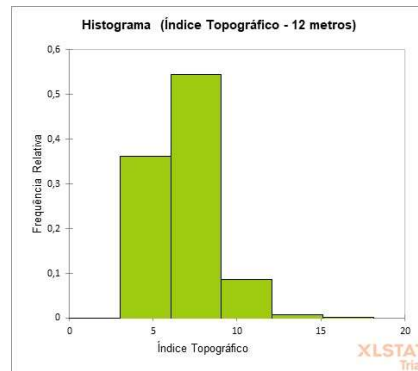
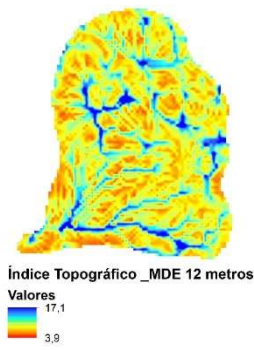


Figura 4. Índices Topográficos referentes aos MDEs de 12m, 20m, 30m e 45m e seus respectivos histogramas, de BH1

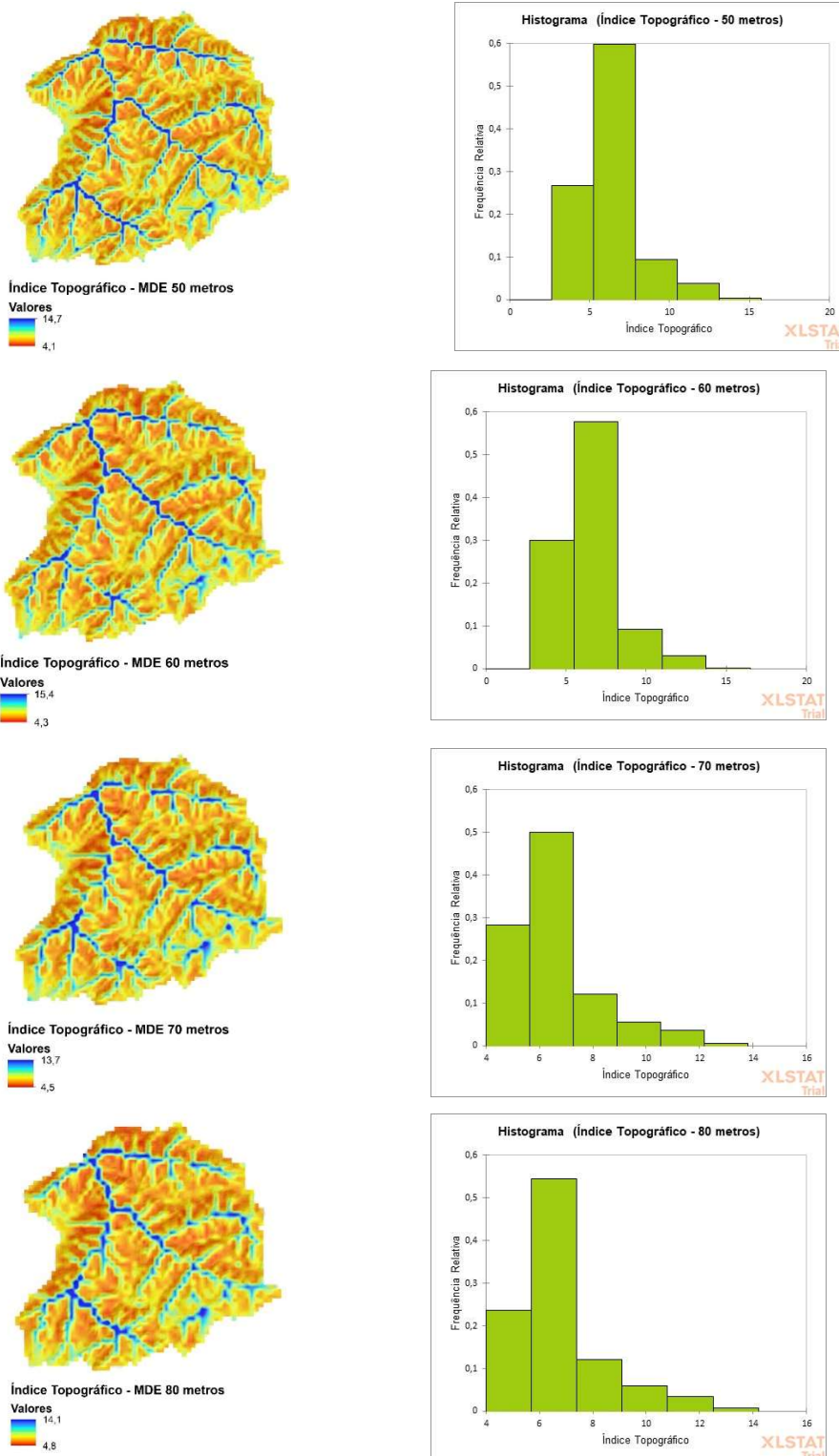


Figura 5. Índices Topográficos referentes aos MDEs de 12m, 20m, 30m e 45m e seus respectivos histogramas, de BH2.

Quanto à BH1 (Figura 4), é possível notar uma maior variabilidade dos valores de IT gerados pelo MDE de 12m. Os valores de IT mais altos, em azul, formam uma rede de



interligação de áreas mais propensas à geração de escoamento superficial por excesso de saturação dos solos. Esse comportamento, porém, não é apresentado pelo IT oriundo do MDE de resolução espacial mais grosseira (45m), onde as áreas com valores mais altos de IT se concentraram nas áreas mais úmidas, próximas ao curso d'água de BH1 e de maior declividade. Nota-se que a espacialização do IT de 45 m foi mais generalizada.

Por sua vez, em BH2, nota-se pouca diferença na espacialização dos valores de IT. A diferença entre os valores de IT obtidos pelos MDEs de 50 e 80 metros pode ser percebida, de modo mais evidente, nas bases das encostas e nos canais fluviais, onde os valores de IT são mais altos, demonstrando que, nessa bacia hidrográfica, as áreas mais propensas à geração de escoamento superficial e subsuperficial estão localizadas em áreas com menores declividades e onde o lençol freático está em menor profundidade.

De fato, a qualidade do conteúdo da informação contida nos MDEs, devido sua resolução espacial, demonstrou influenciar o resultado do cálculo dos mapas de IT, ainda que de maneira discreta, como demonstrado nos resultados de BH2. Todavia, deve-se atentar que isso não significa que o MDE de resolução mais alta seja sempre o mais útil, sendo que a resolução ideal deve representar adequadamente os recursos topográficos para uma determinada variável de interesse, mesmo esses recursos sendo originados por MDE de resolução mais grosseira (SØRENSEN e SEIBERT, 2007). Esses autores pontuam que as águas subterrâneas, por exemplo, podem seguir um padrão topográfico mais geral, dependendo menos de variações em pequena escala.

Pode-se afirmar, pelos resultados apresentados, que a qualidade dos recursos topohidrológicos calculados a partir de MDEs são sensíveis à precisão e à resolução espacial do MDE utilizado, assim como apontou Vaze (2010). A resolução espacial dos MDEs influencia os valores dos atributos terrestres calculados a partir dos modelos de elevação, de modo a criar uma paisagem mais suave, menos definida, com gradientes de inclinação mais moderados, curvaturas de terreno mais reduzidas (THOMPSON et. al. 2001).

Capoane et. al. (2017) obtiveram resultados com padrões semelhantes aos encontrados em BH1 e BH2, notando uma diminuição dos valores máximos de IT e aumento dos valores mínimos e médios, na medida em que diminuíram a resolução espacial dos MDEs (20, 30 e 90 m) em estudo sobre os efeitos dessas resoluções nos cálculos de IT em um município na região sul do Brasil. Outras variáveis que



apresentaram comportamentos semelhantes à BH1 e BH2 foram o desvio padrão e o *range*, revelando que, conforme a resolução do MDE diminui, os intervalos dos valores de IT também decrescem. Esse comportamento tem como consequência a subestimação das áreas úmidas e superestimação das áreas mais secas.

Os trabalhos de Straumann e Purves (2007), Grimm et. al. (2018), Varela e Campana (2000) e Saulnier et. al. (1997) corroboram, ainda, os resultados obtidos nesse trabalho.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

De acordo com os resultados apresentados e pela discussão realizada, é notável que a qualidade do cálculo de IT é dependente da resolução espacial dos MDEs base. Quanto mais refinado forem as informações contidas no arquivo matricial de caráter topográfico, melhores serão os resultados de IT. Assim, ao menos no caso das simulações feitas através do TOPMODEL, espera-se que a modelagem seja mais coerente com os dados observados, quando os mesmos forem submetidos às avaliações de eficiência.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES pela concessão da bolsa de estudos e à Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, pelo suporte, investimento e compromisso com a pesquisa.

REFERÊNCIAS

BEVEN, K. J.; KIRKBY, M. J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. **Hydrological Sciences**. Londres. v. 24. p. 43-69. 1979. doi: 10.1080/02626667909491834.

CAPOANE, V., COSTA, L. F. F., KUPLICH, T. M. Identificação das áreas susceptíveis a transferência de poluentes para os sistemas aquáticos utilizando álgebra de mapas. **Caminhos de Geografia**. v. 18, n. 62, p. 114-124. 2017.

DUNNE, T. Field studies of hillslope flow processes. In: KIRKBY, M. J. (Ed.). *Hillslope hydrology*. London: **Wiley**, 1978. p. 227-293.



GRIMM, K., NASAB, M. T., CHU, X. TWI Computations and Topographic Analysis of Depression-Dominated Surfaces. **Water**. v. 10, n. 5, p. 663-675. 2018.

HORTON, R. E. The role of infiltration in the hydrologic cycle. Eos, **Transactions, American Geophysical Union**, v. 14, n. 1, p. 446-460, 1933.
<http://dx.doi.org/10.1029/TR014i001p00446>.

SANTOS, I. **Modelagem geohidrobiológica como ferramenta no planejamento ambiental: estudo da bacia hidrográfica do rio Pequeno, São José dos Pinhais – PR**. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Setor de Ciências Agrárias. Universidade Federal do Paraná – UFPR. Curitiba, 2001.

SAUNIER, G. M., OBLED, C. BEVEN, K. Analytical compensation between DTM grid resolution and effective values of saturated hydraulic conductivity within the topmodel framework. **Hydrological Processes**. v. 11. P. 1331-1346. 1997.

SØRENSEN, R.; SEIBERT, J. Effects of DEM resolution on the calculation of topographical indices: TWI and its components. **Journal of Hydrology**. v. 347 (1), p.79-89. 2007.

STRAUMANN, R. K; PURVES, R. S. Resolution sensivity of a compound terrain derivative as computed from LIDAR-based elevation data. In. Fabrikant S.I., Wachowicz M. (org). **Lecture Notes in Geoinformation and Cartography**. p. 87-109. 2007.

THOMPSON, J. A., BELL, J. C., BUTLER, C. A. Digital elevation model resolution: effects on terrain attribute calculation and quantitative soil-landscape modeling. **Geoderma**. v. 100, p. 67-89, 2001.

VARELLA, R. F.; CAMPANA, N. A. Simulação matemática do processo de transformação de chuva em vazão: estudo do modelo TOPMODEL. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v. 5, n. 4, 121-139, 2000.

VAZE, J., TENG, J., SPENCER, G. Impact of DEM accuracy and resolution on topographic indices. **Environmental Modelling & Software**, v. 25 (10), p. 1086-1098. 2010.