

XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

ACELERAÇÃO DO MODELO HAND POR GPGPU: ESTUDO DE CASO PARA BACIA DO RIO ITAJAÍ

José Vinícius Boing de Souza¹; Tomas Carlotto²; Camyla Innocente dos Santos³; Pedro Luiz Borges Chaffe⁴

RESUMO – O mapeamento de áreas de risco de inundação por modelos digitais de elevação (MDE) consiste uma alternativa viável e de baixo custo que se destaca pela aplicabilidade em locais com ausência de dados hidrológicos. Este estudo é importante por apresentar um algoritmo que reduz o tempo de cálculo do descritor HAND, ampliando sua utilização para casos que abrangem grandes áreas ou com MDE de resoluções mais detalhadas, também possibilitando a utilização outras metodologias que envolvam MDE. Este estudo teve como objetivo desenvolver um algoritmo em paralelo para o cálculo do descritor de terreno HAND capaz de reduzir o tempo de processamento. O algoritmo foi desenvolvido em duas linguagens, MATLAB para CPU e CUDAC para GPU. Foram utilizados MDE de diferentes resoluções (90, 30 e 12,5 metros) da bacia do rio Itajaí. O algoritmo em paralelo apresentou uma redução considerável para todas as resoluções, reduzindo 343 vezes o tempo necessário para processar resolução de 12,5 metros, passando de 6 horas para 1 minuto. A utilização da GPU se mostrou promissora para o mapeamento de áreas de risco a partir de MDE, com grande acessibilidade (realizável em um computador pessoal) e apresentando uma redução considerável do tempo para as três resoluções testadas.

ABSTRACT – Flood hazard mapping based on Digital Elevation Model (DEM) are a low cost and feasible alternative that stands out for its applicability in regions with no hydrological data. This study is important because it presents an algorithm that reduces the calculation time of the terrain descriptor HAND, increasing its application in cases involving large areas or high-resolution DEM and for other methodologies involving DEM. The objective of this study was developed a parallel algorithm that calculates de terrain descriptor HAND, reducing the processing time. Two computing languages was utilized, MATLAB for processing in CPU and CUDAC for GPU. It was used four different DEM of the Itajaí river basin with different resolutions (90, 30 and 12.5 meters). The parallel algorithm obtained a notable reduction of processing time for all resolutions, reducing 343 times the simulation time for the 12.5 meters resolution, going from 6 hours to 1 minute. GPU is a promising technology for flood hazard mapping that uses DEM as a basis, with high accessibility (applicable in a personal home computer) and presenting a considerable reduction for all tested resolutions.

Palavras chave - CUDA; HAND; Mapeamento de áreas de risco.

¹ Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental – Universidade Federal de Santa Catarina; joseboing@gmail.com

² Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental – Universidade Federal de Santa Catarina; thomas.carl@hotmail.com

³ Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental – Universidade Federal de Santa Catarina; camylainnocente@gmail.com

⁴ Docente do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – Universidade Federal de Santa Catarina; pedro.chaffe@ufsc.br

INTRODUÇÃO

A ocupação de áreas próximas a rios é comum na história da humanidade por permitir fácil acesso a água, terras férteis e navegação. Mudanças climáticas têm intensificado os ciclos hidrológicos, implicando em riscos a estas regiões devido à ocorrência de desastres naturais hidrológicos cada vez mais frequentes (ALFIERI *et al*, 2017). As inundações são um dos desastres naturais que mais afetam a vida das pessoas no Brasil. Entre 1991 e 2012, foram registrados 449 casos de inundações caracterizadas como desastres em Santa Catarina, dentre os quais 104 estiveram localizados no Vale do Itajaí (BRASIL, 2013).

A prevenção de desastres dessa natureza pode ser efetuada por meio da adoção de medidas estruturais, como obras que modificam o sistema fluvial, e não estruturais, como mapeamento de áreas de risco de inundação, monitoramento e modelagem hidrodinâmica (REFOSCO *et al*, 2013). Apesar de modelos hidráulicos apresentarem boa capacidade de mapeamento de áreas de risco, necessitam de dados que não estão disponíveis para diversos rios (SAMELA *et al*, 2015), tais como topografia local, séries históricas de precipitação e vazão, etc. Métodos alternativos vêm sendo desenvolvidos nos últimos anos, como a utilização de modelos digitais de elevação (MDE) para a extrapolação de atributos hidrogeomorfológicos, a partir dos quais é realizada a delimitação de mapas de inundação (NARDI *et al*, 2013; SAMELA *et al*, 2015; NOBRE *et al*, 2016).

Estudos de mapeamento que empregam descritores de terreno vêm ganhando espaço nos últimos anos devido ao aumento da disponibilidade de MDE (MANFREDA *et al*, 2011; NARDI *et al*, 2013; NOBRE *et al*, 2016). Diversos destes modelos podem ser obtidos livremente, como o ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) e o SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*). Entretanto, a precisão das informações pode variar drasticamente com a origem do MDE (ALI *et al*, 2015). Li e Wong (2010) demonstraram as diferenças e erros em redes de drenagem geradas a partir de diferentes MDE.

Dentre os descritores frequentemente empregados destaca-se o *Height Above the Nearest Drainage* (HAND), apresentado por RENNÓ *et al*. (2005). Neste método, o mapeamento das áreas alagáveis é realizado a partir de um MDE, através do cálculo da diferença entre a elevação de um ponto até o ponto de drenagem mais próximo. O HAND tem sido utilizado para o mapeamento de áreas de risco de inundação na Amazônia e no sul do Brasil (NOBRE *et al*, 2011; SPECKHANN *et al*, 2017; GOERL *et al*, 2017), apresentando resultados satisfatórios.

A aplicação do HAND em grande escala apresenta desafios, como exposto no trabalho desenvolvido por Liu *et al*. (2018), que apresenta o mapeamento de áreas de risco nos Estados Unidos com a aplicação do HAND. Dificuldades encontradas durante a aplicação do método em grandes

áreas incluem: necessidade de processamento de grande quantidade de dados, elevado tempo de processamento, e dificuldade de automatização do processo. Uma solução para estes problemas é a utilização de técnicas de processamento paralelo dos cálculos, reduzindo o tempo necessário e permitindo a aplicação do método para áreas maiores. Uma opção barata e acessível é a utilização de uma GPGPU (*General Purpose Graphics Processing Unit*) para realizar o processamento paralelo (LAMB *et al*, 2010).

O objetivo deste trabalho é desenvolver um algoritmo capaz de realizar o cálculo do HAND para a bacia do rio Itajaí de forma paralelizada em CUDA de modo a obter uma redução no tempo de simulação.

METODOLOGIA

Área de estudo

A Figura 1 apresenta a bacia de estudo: a sub-bacia do rio Itajaí localizada no sul do Brasil, no leste do estado de Santa Catarina. A bacia está incluída na bacia hidrográfica do Atlântico – trecho sudeste, na região hidrográfica do Atlântico Sul (MARCUIZZO, 2017).

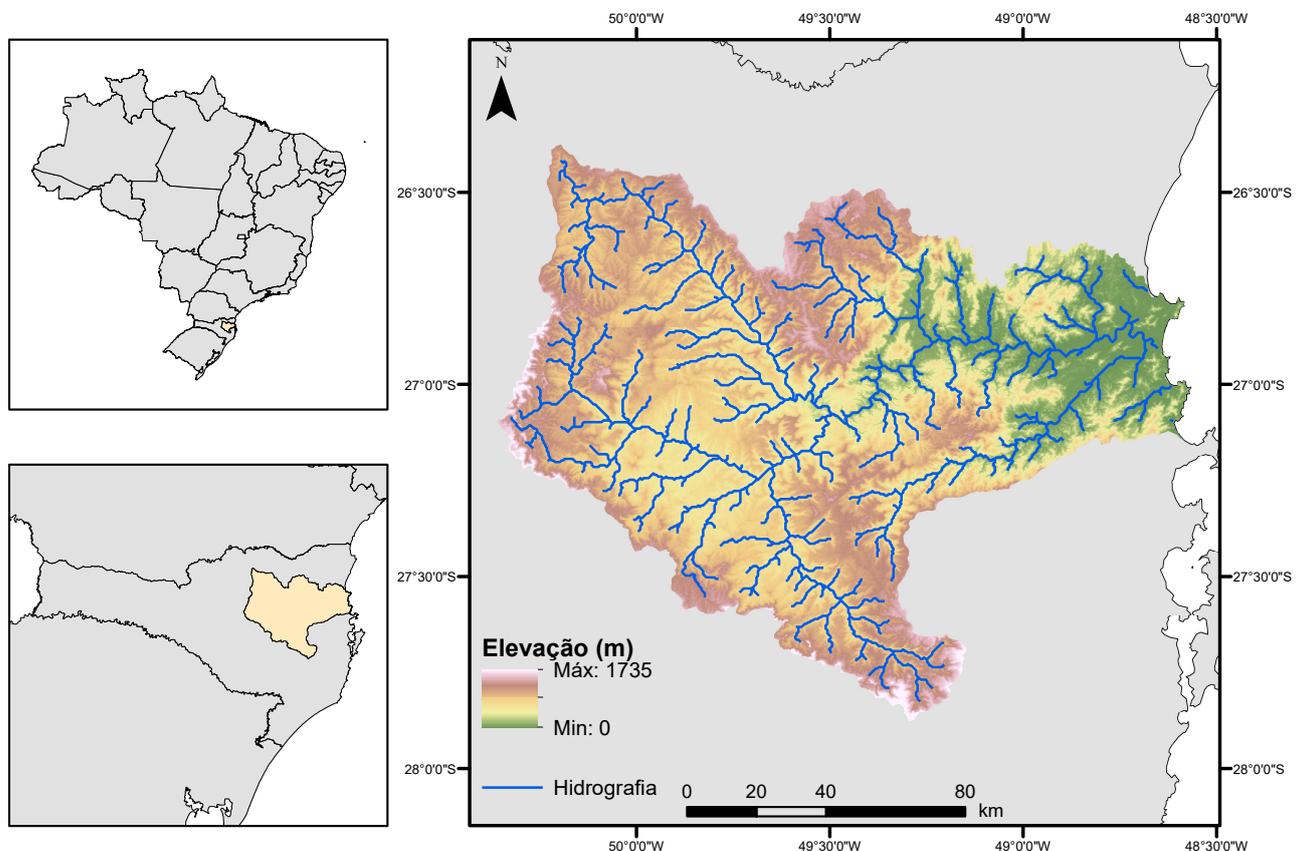


Figura 1: Localização e elevação da bacia do rio Itajaí.

Com área aproximada de 15.000 km², a bacia abrange 72 municípios. A região da bacia apresenta dois climas distintos, sendo a maior parte Cfa (temperado úmido com verão quente) e menor parte, ao norte, Cfb (temperado úmido com verão temperado). A precipitação média anual varia no interior da bacia, apresentando valores entre 1.456mm na região central e 1.931 mm no nordeste (MACHADO e MARCUZZO, 2015). A bacia é frequentemente afetada por eventos hidrológicos, apresentando registros de inundações desde 1850 (CEOPS, 2010).

Modelo Digital de Elevação

Os modelos digitais utilizados neste trabalho, selecionados por cobrirem toda a área da bacia hidrográfica e por estarem disponíveis livremente na internet, são oriundos da NASA, das missões SRTM e ASTER (Disponível em: <https://vertex.daac.asf.alaska.edu/>), e da plataforma VERTEX do satélite ALOS PALSAR (Disponível em: <https://gdex.cr.usgs.gov/gdex/>). O MDE disponibilizado pela SRTM apresenta resoluções de 90 m e 30 m, o MDE da ASTER possui resolução de 30 m e o modelo do ALOS PALSAR resolução de 12,5 m. A Figura 2 apresenta uma comparação entre as resoluções do modelo de elevação.

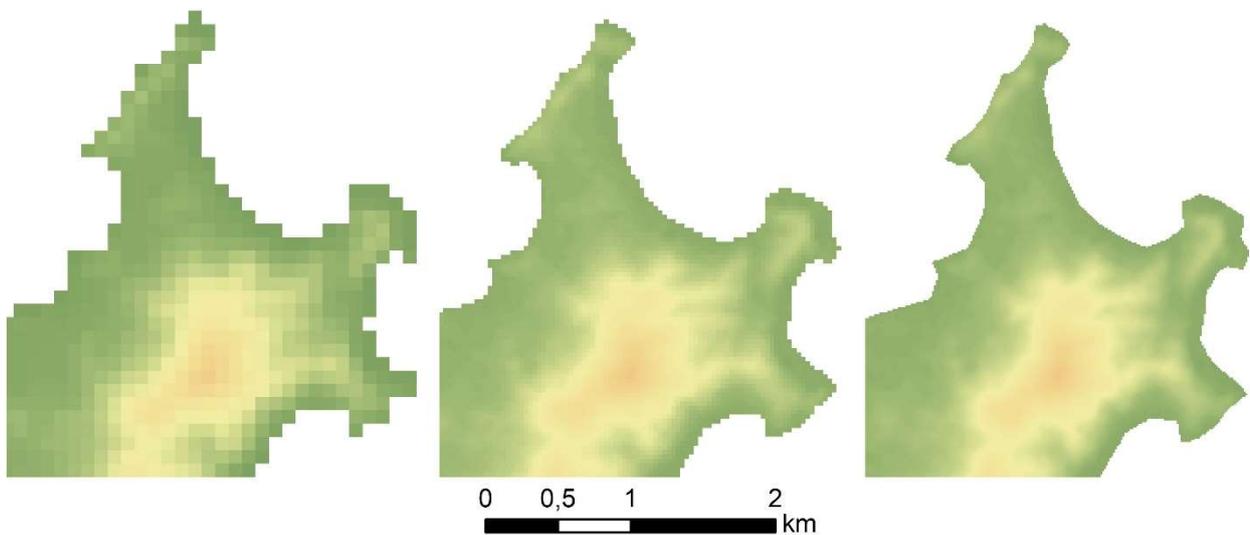


Figura 2: Modelos Digitais de Elevação (90 m esquerda, 30 m centro e 12,5 m direita)

Altura acima da drenagem mais próxima (HAND)

O descritor de terreno HAND é um modelo digital de topografia normalizado em relação ao ponto de drenagem mais próximo, obtido a partir de uma série de processos aplicados a um MDE. Para obtenção do HAND, o modelo foi corrigido para a remoção de incoerências e obtenção de um modelo hidrológicamente coerente, a fim de determinar a direção de fluxo de cada elemento do raster. A partir da direção de fluxo foi gerado um mapa de acumulação de fluxo, que serve de base para a definição da rede de drenagem.

Para a realização do cálculo do HAND para a bacia do rio Itajaí foi desenvolvido um algoritmo no MATLAB e em CUDA com a linguagem C. O algoritmo utiliza a ferramenta TopoToolbox (disponível em <https://topotoolbox.wordpress.com>) para a realização do pré-processamento do MDE no MATLAB, que consiste na correção de incoerências e imperfeições, e no cálculo da direção e da acumulação de fluxo. A rede de drenagem foi originada com base na acumulação de fluxo. Os valores de corte para a definição da rede de drenagem foram adotados com base nos valores apresentados por Speckhann et. al (2018): 556 para células de 90 x 90 m, 5.000 para células de 30 x 30 m e 28.800 para células de 12,5 x 12,5 m.

Os pontos que possuem a direção para um ponto fora do limite da bacia hidrográfica, que entram em *loop*, que apresentam direção nula, ou que resultam em valor de altitude nulo foram desconsiderados. Desta forma, o algoritmo segue as seguintes etapas, para cada elemento da matriz (raster): (i.) Verificar se a acumulação de fluxo é maior que o limite, e caso for, inserir valor 0 (zero) na matriz do HAND; (ii.) Caso o valor de acumulação do fluxo seja menor que o limite, o algoritmo armazena a altura do elemento e verifica o elemento seguinte, conforme a direção de fluxo. Esta etapa se repete até encontrar um elemento na matriz com a acumulação de fluxo maior que o limite; (iii.) Ao encontrar um elemento com valor de acumulação de fluxo acima do limite, a altura deste elemento é armazenada, e para o elemento original é feita a diferença das alturas como o valor do HAND. Caso entre numa das considerações, o algoritmo atribui valor zero ao elemento original.

Implementação Paralela

A lógica do cálculo do HAND foi transferida para o CUDA com o desenvolvimento de um kernel na linguagem CUDA C. Desta forma, o processo é paralelizado para ser executado na placa gráfica (GPU). O computador utilizado neste trabalho é equipado com um processador Intel Core i7-7700 HQ de 2.80GHz, 16GB de RAM e placa gráfica NVIDIA GeForce GTX 1050Ti com 4GB de memória.

O algoritmo do kernel segue o mesmo processo que na CPU: (i.) Verificação da rede de drenagem; (ii.) Caminho até a rede de drenagem mais próxima; e (iii.) Cálculo da diferença de alturas. Entretanto, esse kernel é processado paralelamente por todas as *threads* dos blocos ativos, de forma que cada *thread* seja responsável pelo cálculo de um elemento da matriz do HAND. O código paralelo usa uma estrutura vetorizada em que as matrizes são transformadas em vetores unidimensionais permitindo a simplificação do código. A disposição das *threads* se dá na forma unidimensional, determinando um índice para cada elemento da matriz do HAND igual para todas as matrizes. A Figura 3 apresenta os processos do cálculo do HAND que cada *thread* realiza, tomando como

exemplo matrizes 5x5 transformadas em vetores unidimensionais. A Figura 4 apresenta o pseudocódigo implementado em CUDA C.

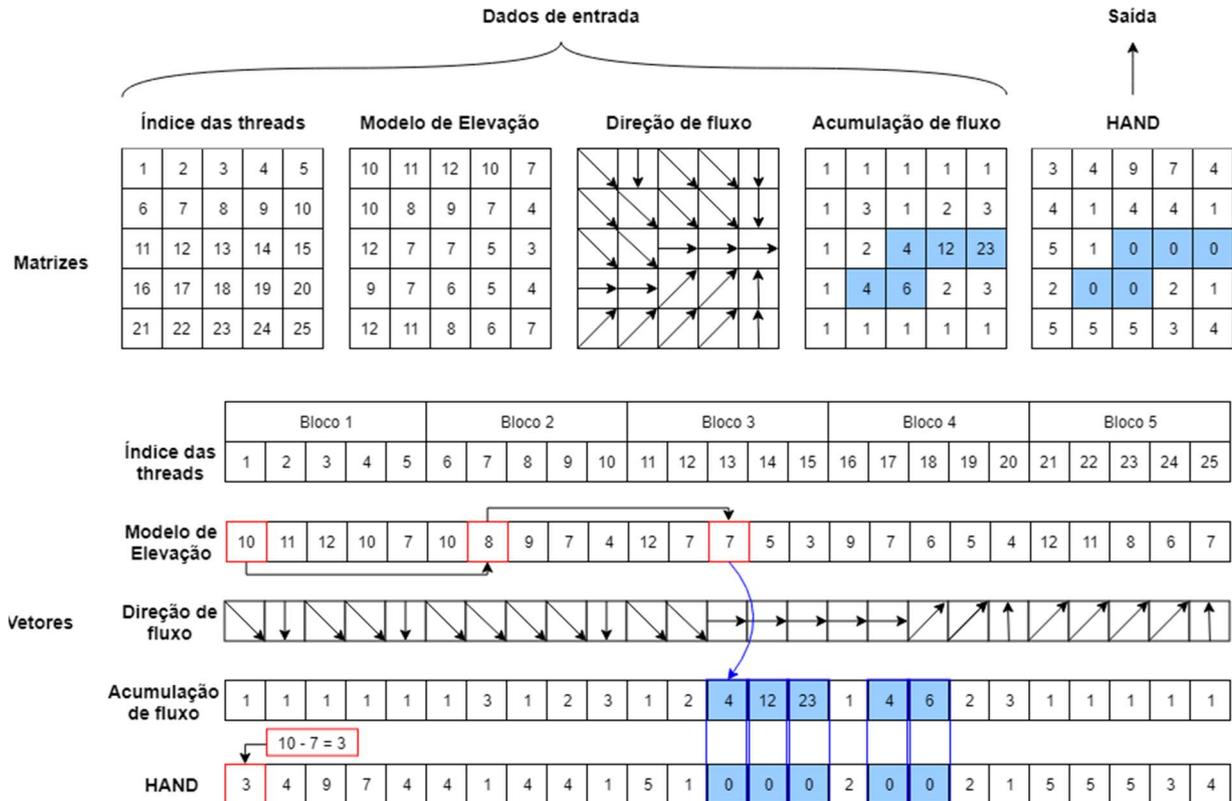


Figura 3: Exemplo das etapas do algoritmo (Em azul: rede de drenagem).

Algoritmo 1: HAND

Dados de entrada: MDE (Matriz de Elevação)
FDR (Matriz de direção de fluxo)
FAC (Matriz de acumulação de fluxo)
VL (Valor limite para rede de drenagem)

Saída: HAND (Matriz com o HAND)

Início

$i \leftarrow$ índice do elemento

Se $FAC[i] \geq VL$
HAND[i] = 0

Se não
posição = i
alturaCelula = MDE[i]

Enquanto $FAC[i] < VL$
posição = posição + FDR[posição]
Se em loop **ou** $MDE[posição] = \text{nulo}$
HAND[i] = -9999
Se $FAC[posição] \geq VL$
HAND[i] = alturaCelula - MDE[posição]

Fim Se

Fim enquanto

Fim Se

Fim

Figura 4: Pseudocódigo do algoritmo realizado em paralelo nas threads.

Foram definidos os seguintes tipos de variável para cada matriz: uint8 para direção de fluxo, uint32 para acumulação de fluxo, e int16 para MDE e HAND. Estes tipos de variáveis ocupam menos espaço de memória e são utilizados neste trabalho para evitar que a capacidade da placa gráfica seja excedida quando as matrizes (MDE, direção de fluxo, e acumulação de fluxo) forem copiadas para a memória da GPU.

RESULTADOS

A Figura 5 apresenta o resultado do cálculo do HAND, exibindo os mapas de altura para a maior e menor resoluções simuladas com a utilização da GPU. Os resultados gerados pelo algoritmo foram semelhantes para MDE de diferentes resoluções.

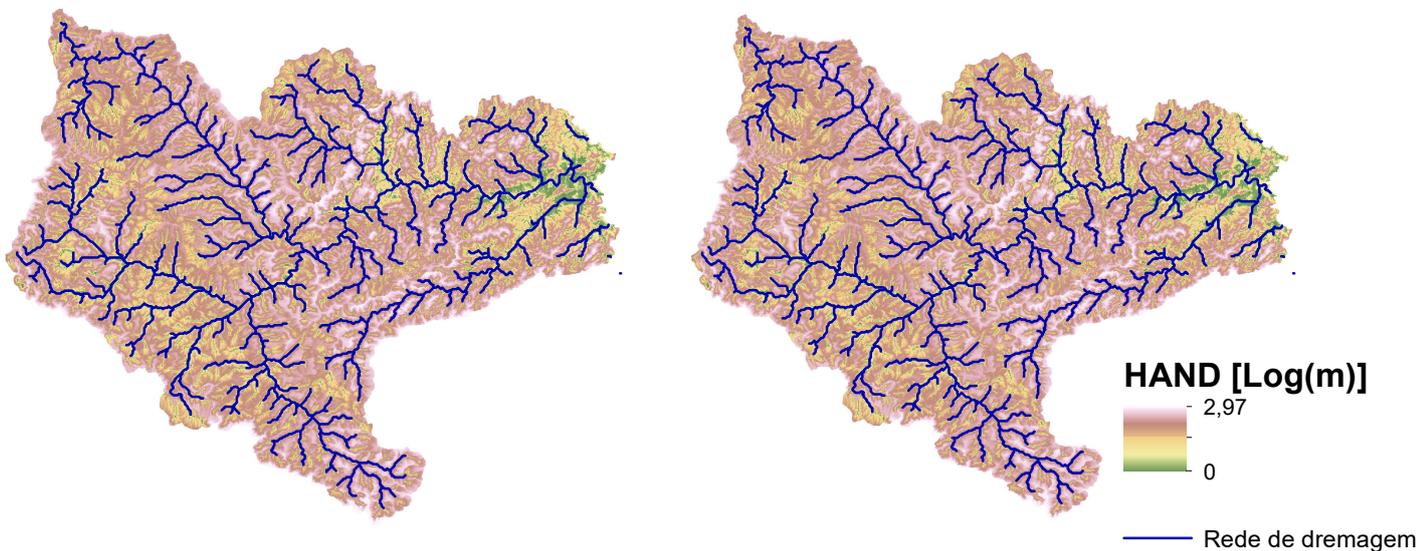


Figura 5: Mapa do HAND para 90 m (esquerda) e 12,5 m (direita).

A Tabela 1 apresenta a comparação entre os tempos de processamento do algoritmo do HAND, realizados serialmente em MATLAB e paralelamente em Kernels de CUDA. O algoritmo paralelizado foi mais rápido que seu desempenho quando executado serialmente. O aumento da resolução do raster de entrada resultou em diferenças relevantes no tempo de processamento.

Tabela 1 - Tempo de execução do algoritmo HAND para cada resolução, na CPU e GPU

Processamento	Tempo para o cálculo do HAND (segundos)			
	SRTM (90m)	SRTM (30m)	ASTER (30m)	VERTEX (12,5m)
CPU	18,35	740,26	753,52	21182,82
GPU	0,74	9,00	8,03	61,70

Enquanto o tempo de processamento para a menor resolução (90 m) mostrou uma redução de 24 vezes com a utilização da GPU, o desempenho para resoluções maiores foi ainda melhor, com

redução de 80 a 90 vezes para um raster de 30 metros e uma redução de 343 vezes para 12,5 metros. Essas diferenças mostram a vantagem e o potencial do uso de GPU nos cálculos de modelos-

Além da comparação no tempo de processamento da etapa do cálculo do HAND, foi verificado o tempo de que a ferramenta TopoToolbox necessita para realizar as etapas anteriores: correção de imperfeições, direção de fluxo, e acumulação de fluxo. A Tabela 2 apresenta estes resultados. A aplicação em paralelo reduz consideravelmente o tempo total do algoritmo, principalmente quando aplicado a resoluções maiores. Entretanto, as etapas prévias ao HAND, principalmente a direção de fluxo, também requerem um tempo de processamento considerável. Mesmo que o tempo necessário para o cálculo do HAND para uma bacia não se apresente muito alto, o cálculo de regiões consideravelmente grandes, como um estado ou país inteiro, pode se tornar inviável devido ao tempo de processamento acumulado para todas as bacias.

Tabela 2 - Tempo de execução de todas as etapas do modelo

Etapa	Tempo necessário (segundos)			
	SRTM 90m	SRTM 30m	Aster 30m	Vertex 12,5m
Correções	2,14	19,5	19	21,53
Direção de Fluxo	2,33	24,6	22,9	123,07
Acumulação de Fluxo	0,03	0,43	0,31	2,45
HAND (CUDA)	0,74	9	8,03	61,7

CONCLUSÕES

Neste trabalho foi desenvolvido um algoritmo capaz de calcular o HAND para a bacia do rio Itajaí (150000 km²), implementado de forma serial em CPU e paralela em GPU. O algoritmo apresentou um tempo de processamento elevado, principalmente para o MDE de maior resolução (12,5 m). Quando aplicado paralelamente, apresentou uma redução considerável no tempo de simulação, principalmente para o MDE de maior resolução, com uma redução de quase 6 horas para apenas um minuto de simulação.

A utilização de GPGPU para o processamento em paralelo se apresenta como uma ferramenta promissora para a modelagem e simulação de descritores de terreno. Além de reduzir substancialmente o tempo necessário de processamento, esta tecnologia requer apenas um computador pessoal para a sua utilização, sendo mais acessível do que outras alternativas tecnológicas de processamento em paralelo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq e CAPES pelo suporte financeiro para a realização da pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ALFIERI, L.; BISSELINK, B.; DOTTORI, F.; NAUMANN, G.; DE ROO, A.; SALAMON, P.; WYSER, K.; FEYEN, L.; (2017). “Global projections of river flood risk in a warmer world”. *Earth’s Future*, 5, pp, 171–182.
- ALI, A.; SOLOMATINE, D. P.; BALDASSARRE, G. (2015). “Assessing the impact of diferente sources of topographic data on 1-D hydraulic modelling of floods”. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19, pp 631-643.
- CEPED, Centro Universitário de Estudos e Pesquisas Sobre Desastres. (2013) “Atlas brasileiro de desastres naturais. 1991 a 2012: Volume Santa Catarina”. Florianópolis, UFSC, 169p.
- CEOPS, Centro de Operação do Sistema de Alerta da Bacia do Itajaí. (2010) “Picos de Enchentes Registrados na Bacia do Rio Itajaí-Açú”. Disponível em: <<http://ceops.furb.br/index.php/sistema-de-alerta/picos-de-enchentes>>. Acesso em: 12 de abril de 2019.
- GOERL, R. F.; CHAFFE, P. L. B.; SPECKHANN, G. A.; PELLERIN, J. R. G. M.; FLORES, J. A. A.; ABREU, J. J.; SANCHEZ, G.; (2017) “O modelo HAND como ferramenta de mapeamento de áreas propensas a inundar”. in *Anais do XXII Simpósio Brasileiro de Recursos hídricos*, Florianópolis, 1, pp. 1-8
- LAMB, R.; CROSSLEY, M.; WALLER, S. (2016) “A fast two-dimensional floodplain inundation model”. *Water Manegement* 162, pp. 362-370.
- LI, J.; WONG, D. W. S. (2010). “Effects of DEM sources on hydrologic applications”. *Computers, Environment, and Urban Systems*, 34, pp. 251-261.
- Liu, Y. Y.; Maidment, D. R.; Tarboton, D. G.; Zheng, X.; Wang, S.; (2018), "A CyberGIS Integration and Computation Framework for High-Resolution Continental-Scale Flood Inundation Mapping,". *Journal of the American Water Resources Association*, 54(4), pp. 770-784.
- NARDI, F.; BISCARINI. C.; FRANCESCO, S.; MANCIOLA, P.; UBERTINI L.; (2013) “Comparing a large-scale DEM-based floodplain delineation algorithm with standard flood maps: the Tiber river basin case study”. *Irrigation and Drainage*, 62 (2), pp. 11–19.

NOBRE, A. D.; CUARTAS, L. A.; HODNETT, M.; RENNÓ, C. D.; RODRIGUES, G.; SILVEIRA, A.; WATERLOO, M.; SALESKA, S.; (2011). “Height Above the Nearest Drainage - a hydrologically relevant new terrain model”. *Journal of Hydrology* 404, pp. 13-29.

MACHADO, J. L. F.; MARCUZZO, F. F. N. (2015). “aquíferos da bacia hidrográfica do rio Itajaí no estado de Santa Catarina”. In *Anais do XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Brasília, 1, pp. 1-8.

MARCUZZO, F. F. N. (2017). “Bacias hidrográficas e regiões hidrográficas do Brasil: cálculos de áreas, diferenças e considerações”. In *Anais do XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Florianópolis, 1, pp. 1-8.

NOBRE, A. D.; CUARTAS, L. A.; MOMO, M. R.; SEVERO, D. L.; PINHEIRO, A.; NOBRE, C. A., (2016). “HAND contour: a new proxy predictor of inundation extent”. *Hydrological Processes* 30, pp. 320-333, 2016.

SAMELA, C.; MANFREDA, S.; PAOLA, F. D.; GIUGNI, M.; SOLE, A.; FIORENTINO, M.; (2015) “DEM-based approaches for the delineation of flood-prone areas in an ungauged basin in Africa”. *Journal of Hydrologic Engineering* 21(2), pp. 1-10

REFOSCO, J. C.; SILVA, G. S.; ESKELSEN, C. R.; NICOLETTI, A. L.; CORDERO, A.; SALVADOR, D. F.; (2013) “Mapas de inundação a partir de geoprocessamento e georreferenciamento - o caso de Blumenau (SC)”. in *Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Foz do Iguaçu, Abril 2013, pp. 4594-4600.

RENNO, C. D.; NOBRE, A. D.; CUARTAS, L. A.; SOARES, J. V.; HODNETT, M. G.; TOMASELLA, J.; WATERLOO, M. J.; (2005) “HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM: Mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia”. *Remote Sensing of Environment*, 112. pp. 3469-3481.

SPECKHANN, G. A.; CHAFFE, P. L. B.; GOERL, R.F.; ABREU, J. J.; FLORES, J. A. (2017) “Flood hazard mapping in Southern Brazil: a combination of flow frequency analysis and the HAND model”. *Hydrological Sciences Journal* 63(1), pp. 87-100.

SPECKHANN, G. A. (2018) “Uma proposta de mapeamento de risco de inundação na bacia do Rio Itajaí utilizando descritores de terreno” *Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina.* pp. 92.