XXVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos
23 a 28 de novembro de 2025 - Vitória - ES

ABRHidro
Associação Brasileira de Recursos Hídricos

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

AVALIAÇÃO DE EQUAÇÕES DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS COM HEC-RAS: ESTUDO DE CASO NO ARROIO PERDIZES (CAMBARÁ DO SUL/RS)

M.R. Fagundes; K. Campagnolo; D. de Menezes; B.H. Abatti; L.R. Paul; F.M. Fan; M. Kobiyama

Abstract: Sediment transport simulation is a valuable approach for understanding erosion and deposition processes in fluvial systems. In this context, the present study aimed to comparatively evaluate different empirical sediment transport equations applied in 1D and 2D hydrodynamic simulations using the HEC-RAS software. The study was conducted in a section of the Perdizes Stream, located in Cambará do Sul (RS), based on discharge data, bed sediment grain size distribution, and a high-resolution Digital Terrain Model. Four distinct equations were considered: (i) Meyer-Peter Müller; (ii) Laursen-Copeland; (iii) Yang; and (iv) Wilcock-Crowe. The 1D simulation results indicated similar patterns among most equations, except for Wilcock-Crowe. In contrast, the 2D simulations showed greater variability, with the Yang equation presenting the highest sediment transport capacity and concentration. The results highlight the model's sensitivity to the choice of transport equation and input parameters, reinforcing the importance.

Resumo: A simulação do transporte de sedimentos é uma abordagem valiosa para compreender os processos de erosão e deposição em sistemas fluviais. Nessa perspectiva, este estudo teve como objetivo avaliar comparativamente diferentes equações empíricas de transporte de sedimentos aplicadas em simulações hidrodinâmicas 1D e 2D, utilizando o software HEC-RAS. O estudo foi conduzido em um trecho do arroio Perdizes, localizado em Cambará do Sul (RS), com base em dados de vazão, granulometria do leito e Modelo Digital de Terreno de alta resolução. Foram consideradas quatro equações distintas: i) Meyer-Peter Müller; ii) Laursen-Copeland; iii) Yang; e iv) Wilcock-Crowe. Os resultados das simulações em 1D indicaram padrões semelhantes entre as equações, com exceção da Wilcock-Crowe. Já nas simulações em 2D, observou-se maior variabilidade, sendo a equação de Yang a que apresentou maior capacidade de carga e concentração de sedimentos. Os resultados evidenciam a sensibilidade do modelo à escolha da equação e aos parâmetros de entrada, reforçando a importância de selecionar métodos compatíveis com as características do sedimento e do fluxo local, além da necessidade de validação com dados de campo.

Palavras-Chave – Modelagem numérica, hidrodinâmica fluvial, equações empíricas.

INTRODUÇÃO

O transporte de sedimentos pelos rios é um processo essencial à dinâmica fluvial, influenciando a morfologia do leito, a disponibilidade de nutrientes e a manutenção dos ecossistemas aquáticos. Essa dinâmica sedimentológica pode ainda influenciar de forma significativa a ocorrência de inundações e no assoreamento de barragens, entre outros. O tamanho dos sedimentos transportados e a quantidade carreada dependem de fatores hidráulicos como, por exemplo, velocidade, vazão e profundidade do escoamento (Mustafa *et al.,* 2017). Dessa forma, uma abordagem eficaz para estudar o comportamento e prever a dinâmica dos sedimentos em cursos d'água é o uso de modelos matemáticos, que buscam representar as alterações no leito fluvial por meio da avaliação dos processos erosivos (Buarque, 2015; Campana, 2018).

Existem diversos modelos destinados a simular o transporte de sedimentos em rios, sendo que os mesmos se diferem entre si pela complexidade, processos considerados e necessidade de dados de entrada (Buarque, 2015). Nesse sentido, cada modelo foi desenvolvido com um propósito específico e, dessa forma, não pode ser considerado como o mais apropriado do que os outros em todas as situações (Yang & Simões, 2008).

Dentre os programas existentes, pode-se citar o HEC-RAS (USACE-RAS, 2021). Esse *software* calcula a capacidade de transporte para solos não coesos e coesos a partir das variáveis hidráulicas (velocidade, profundidade de fluxo e tensão de cisalhamento) e das propriedades do sedimento (Mustafa *et al.,* 2017). Para isso, é considerada a capacidade de transporte do curso de água em análise (carga sólida de arrasto, carga sólida saltante e carga sólida em suspensão) e a quantidade de sedimento disponível (Campana, 2018). Então o programa realiza um balanço no volume de controle, a fim de determinar se a quantidade que entra é maior do que a quantidade que sai, ou o contrário.

Em sua versão mais recente, o HEC-RAS permite que sejam realizadas simulações do transporte de sedimentos em rios de forma unidimensional ou bidimensional e fornece como dados de saída diversas informações, entre elas a quantidade de sedimentos carreados, concentração de sedimentos e informações sobre as mudanças ocorridas no leito (USACE-RAS, 2021). Além disso, o *software* possibilita que o usuário escolha as equações de transporte que serão utilizadas durante as simulações.

A simulação do transporte de sedimentos é desafiadora devido à escassez de bancos de dados com informações detalhadas sobre as características sedimentares dos rios. Do mesmo modo, a obtenção de dados de entrada por meio de análises em campo envolve custos elevados e significativa complexidade operacional. Grande parte dos dados de sedimentos disponíveis são incertos e escassos, e as teorias de transporte utilizadas são empíricas e foram desenvolvidas para cursos de água com características específicas, sendo, dessa forma, altamente sensíveis a uma ampla gama de variáveis físicas e parâmetros do modelo que são difíceis de medir e estimar (USACE-RAS, 2020a).

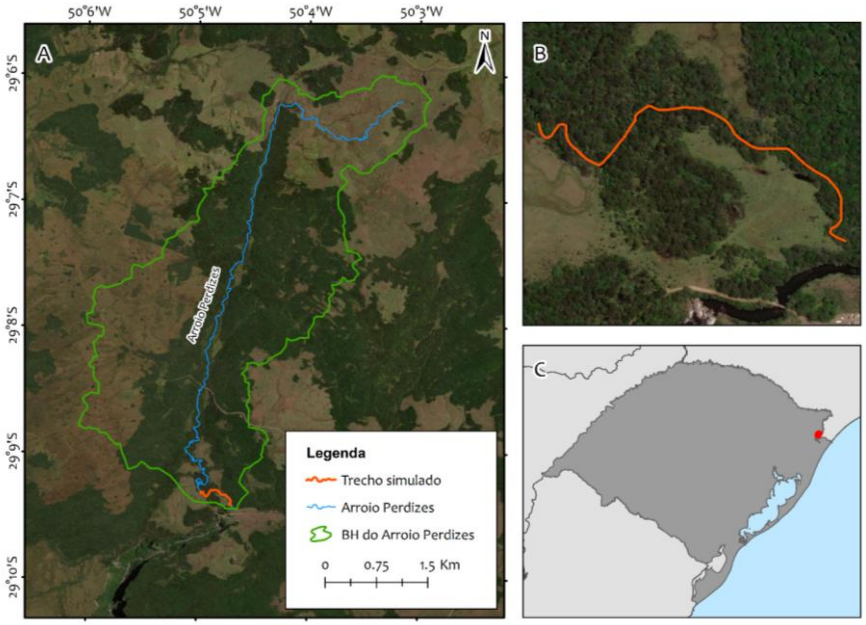
Partindo dessas considerações, o objetivo deste estudo foi avaliar comparativamente diferentes equações empíricas de transporte de sedimentos aplicadas em simulações hidrodinâmicas 1D e 2D com o software HEC-RAS, com foco na análise das alterações no leito do canal após a passagem de uma onda de cheia. A partir dessa abordagem, buscou-se discutir a sensibilidade do modelo à escolha da equação e a similaridade dos resultados obtidos.

METODOLOGIA

Área de estudo

A bacia experimental utilizada nesta análise foi a bacia hidrográfica do arroio Perdizes (15,24 km²), que está inserida no Parque Nacional de Aparados da Serra (PNAS), município de Cambará do Sul (RS). O trecho utilizado para realizar as simulações possui aproximadamente 750 metros de comprimento, largura média de 8 metros e granulometria do fundo predominante de tamanho seixo (Figura 1). A descrição mais detalhada encontra-se em Campagnolo et al. (2024).

Figura 1 - a) Bacia hidrográfica do arroio Perdizes; b) trecho utilizado durante as simulações; e c) localização da bacia hidrográfica do arroio Perdizes no estado do Rio Grande do Sul - Brasil.

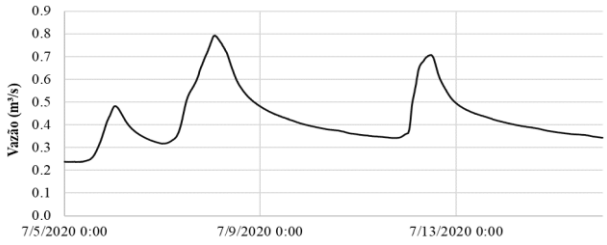


Dados de entrada

Os dados de entrada utilizados nesse estudo foram: i) Modelo Digital de Terreno (MDT) de trecho do arroio Perdizes; ii) registros de vazão relativos a um evento de cheia; e iii) dados relativos à granulometria do canal. O MDT utilizado possui resolução espacial de 1 metro e foi gerado a partir de pontos coletados em campo com o uso de GPS RTK (GNSS Trimble© modelo R8). Dessa forma, o MDT já inclui informações relativas à batimetria do arroio Perdizes.

O hidrograma utilizado nas simulações (Figura 2) é referente ao maior evento de cheia registrado na bacia durante o período monitorado (entre 2018-2021), tendo ocorrido entre os dias 5 e 15 de julho de 2020. Este hidrograma foi obtido a partir de uma correlação entre as vazões registradas pelo sensor de nível do rio Perdizes com as vazões do arroio Perdizes, já que atualmente neste arroio não há monitoramento das vazões.

Figura 2 - Hidrograma de entrada utilizado para a realização das simulações.



Com relação aos dados de granulometria do canal, foram coletadas amostras dos sedimentos de fundo em 26 seções transversais distribuídas ao longo do trecho, resultando em um D_{50} de aproximadamente 3,2 mm. O levantamento topográfico detalhado, bem como a curva granulométrica do trecho, consta em Campagnolo (2021).

HEC-RAS

Para as simulações, foi utilizado o software HEC-RAS versão 6.1. Para realizar a propagação do escoamento, o programa utiliza as Equações de Saint Venant resolvidas numericamente pelo método de Newton-Raphson, em um esquema numérico de quatro pontos (USACE-RAS, 2021). Em

relação ao módulo de sedimentos do HEC-RAS, este está baseado em rotinas de cálculo que resolvem a Equação de Exner, também conhecida como Equação da Continuidade de Sedimentos:

$$(1-\lambda_p)B\frac{\partial \eta}{\partial t} = -\frac{\partial Q_s}{\partial x}$$

onde B é a largura do canal; η é a elevação do canal; λ_p é a porosidade da camada ativa; t é o tempo; x é a distância; e Q_s é a carga de sedimentos transportados.

Assim como as demais equações da continuidade, a equação (a) indica que a diferença entre a quantidade de sedimento que está entrando e a quantidade que está saindo de um determinado volume de controle deve ser armazenada ou removida desse volume (USACE-RAS, 2020). Dessa forma, quando a capacidade de transporte é maior do que a quantidade de sedimentos disponível, o programa satisfaz o déficit por meio da erosão do leito. Já quando a capacidade de transporte é menor do que a quantidade de sedimentos disponíveis, o HEC-RAS considera que o sedimento se deposita.

Para a aplicação do módulo de sedimentos do HEC-RAS, além dos dados relativos à granulometria do leito, é necessário definir os métodos que serão aplicados para calcular a velocidade de queda, para determinar as funções de transporte e para representar a classificação do leito, e também a temperatura da água. No presente estudo, a equação aplicada para calcular a velocidade de queda foi a de Toffaleti, desenvolvida a partir de dados experimentais e que está baseada em curvas empíricas.

Equações utilizadas

Na atual versão do *software* estão disponíveis um total de 11 equações de funções de transporte, sendo que apenas três delas são aplicáveis para simulações realizadas em 2D. As equações são empíricas e foram desenvolvidas considerando rios que possuem diferentes faixas granulométricas. Por esse motivo, foi testada a aplicabilidade de quatro dessas equações. As funções de transporte utilizadas foram a Meyer e Peter Muller (MPM), Laursen e Copeland (LC), Yang, e Wilcock Crowe (WC) que, de acordo com USACE-RAS (2021), são adequadas à faixa granulométrica de sedimentos presentes no arroio Perdizes. Uma descrição completa de cada uma dessas equações está apresentada em USACE-RAS (2020a).

Para classificação do leito (*sorting method*) foi aplicado o Método de Thomas (Ex5). Este método utiliza um modelo de leito de três camadas que forma uma camada de blindagem grossa independente, que limita a erosão das camadas mais profundas e foi desenvolvido considerando rios que possuíam sedimentos grosseiros, ou seja, é aplicável à bacia hidrográfica do arroio Perdizes (USACE-RAS, 2020a). Ressalta-se que, ao aplicar a equação de Wilcock-Crowe o método de classificação aplicado não foi o de Thomas (Ex5), mas sim o da Camada Ativa. Essa alteração foi necessária ao aplicar essa equação do transporte específica, pois, de acordo com USACE-RAS (2020a) a equação de Wicock-Crowe deve sempre ser aplicada em conjunto com esse método. Por fim, a temperatura da água durante a simulação foi considerada como sendo constante em 10 ºC.

Esquema de simulações

As simulações foram realizadas em regime não permanente, em 1D e em 2D, somando um total de 8 simulações. Nota-se que as simulações realizadas em 2D utilizaram a Equação das Águas Rasas resolvidas pelo método Euleriano, a fim de propagar o escoamento ao longo do arroio.

Nesse caso, a condição de contorno dos sedimentos utilizada foi a curva chave. Para a determinação do coeficiente de rugosidade de Manning ao longo do trecho, foi utilizada a equação proposta por Jarrett (1984). Todas as simulações foram realizadas considerando um período de *warming up* do modelo de 20 horas e o valor do parâmetro *theta* utilizado foi de 1,0, ou seja, favorecendo a estabilidade do modelo. O intervalo computacional utilizado foi de 1 segundo e os

demais parâmetros da simulação foram deixados nas configurações padrão do HEC-RAS (USACE-RAS, 2020a).

Análise dos dados

A avaliação dos resultados foi realizada de forma separada para as simulações em 1D e em 2D. Para o caso unidimensional, os resultados obtidos ao utilizar cada uma das funções de transporte foram analisados por meio de gráficos que comparam os valores obtidos para três parâmetros, sendo eles: i) mudanças ocorridas no fundo do canal (m); ii) massa total acumulada (toneladas); e iii) concentração de sedimentos (mg/L). Todas essas variações foram avaliadas ao longo do perfil longitudinal do rio. Já os resultados em 2D foram comparados por meio da análise visual dos mapas resultantes em termos das mudanças ocorridas no fundo do canal (m), da concentração total de sedimentos (mg/L) e da capacidade de transporte de sedimentos (toneladas/dia).

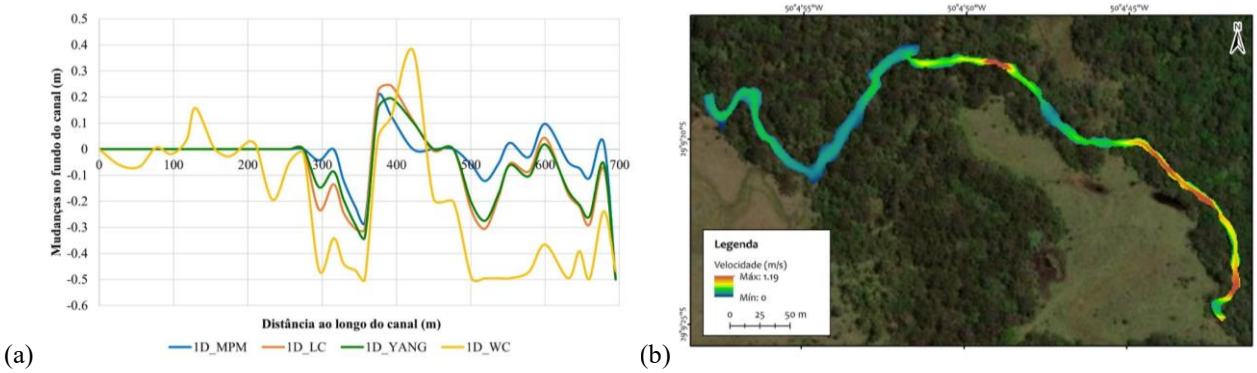
RESULTADOS E DISCUSSÕES

Simulações 1D - erosão e deposição

Na Figura 3 estão apresentados os resultados referentes às mudanças ocorridas no fundo do canal ao longo do perfil longitudinal do arroio Perdizes nas simulações em 1D com quatro diferentes equações. Ao avaliar as zonas de erosão e deposição ao longo do canal, percebe-se que as simulações que utilizaram as equações de Yang, LC e MPM apresentaram comportamento semelhante, ou seja, tiveram a mesma resposta em termos das zonas de erosão ou deposição ao longo do canal. Além disso, para essas equações, a magnitude das mudanças ocorridas no leito do rio foi muito similar.

Já o resultado obtido a partir da equação de WC apresentou comportamento diferente das demais, tendo resultado nos maiores valores de erosão (0,49 m) e nos maiores valores de deposição (0,42 m). Entretanto, apesar dos resultados da simulação 1D_WC, provavelmente superestimados em termos de sua magnitude total, eles são coerentes com os perfis de velocidade obtidos para esse canal (Figura 3), que indicam que as maiores velocidades do fluxo são obtidas na parte mais a jusante do trecho simulado, ou seja, tem tendência a erodir.

Figura 3 – (a) Mudanças no canal do arroio Perdizes em decorrência da passagem da onda de cheia; (b) distribuição espacial da velocidade do fluxo.



(a) (b)

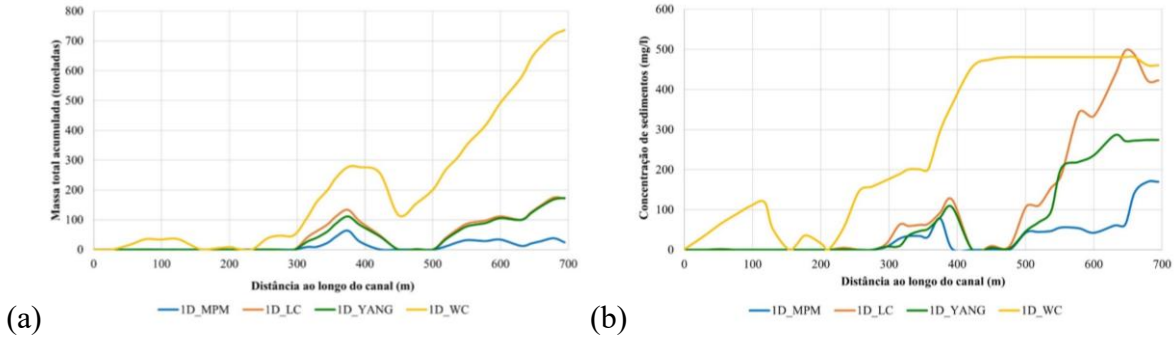
Simulações 1D – Massa total acumulada e concentração de sedimentos

Na Figura 4 estão apresentados os resultados referentes a massa total acumulada ao longo do perfil longitudinal, considerando todo o tempo desde o início da simulação e também os resultados referentes à concentração de sedimentos saindo do volume de controle ao final da simulação. Em ambos os casos as simulações 1D_YANG, 1D_LC e 1D_MPM apresentaram comportamento semelhante, tanto em termos dos locais (maiores massas acumuladas e maiores concentrações de sedimentos), quanto em termos das magnitudes dos valores. A simulação 1D_MPM foi a que

apresentou os menores valores, tendo um máximo de massa acumulada de 19,85 toneladas e uma concentração máxima de sedimentos de 10,99 mg/L.

Novamente, a simulação 1D_WC superestimou os valores obtidos, tendo atingido um máximo da massa total acumulada de aproximadamente 874 toneladas e uma concentração máxima de sedimentos de 1254 mg/L. Apesar das zonas de maiores massas acumuladas e das maiores concentrações serem compatíveis com os locais que apresentam as maiores velocidades ao longo do canal, os valores absolutos obtidos estão superestimados. Essa superestimativa dos valores ao utilizar a equação de WC pode ser advinda de alguma instabilidade durante a realização das simulações ou de algum parâmetro que não tenha sido corretamente ajustado a essa equação, já que, nesse estudo, todas as simulações utilizaram os mesmos valores dos parâmetros de entrada.

Figura 4 – Massa total acumulada ao longo do trecho considerando todo o período da simulação (a) e concentração de sedimentos ao longo do trecho simulado (b).



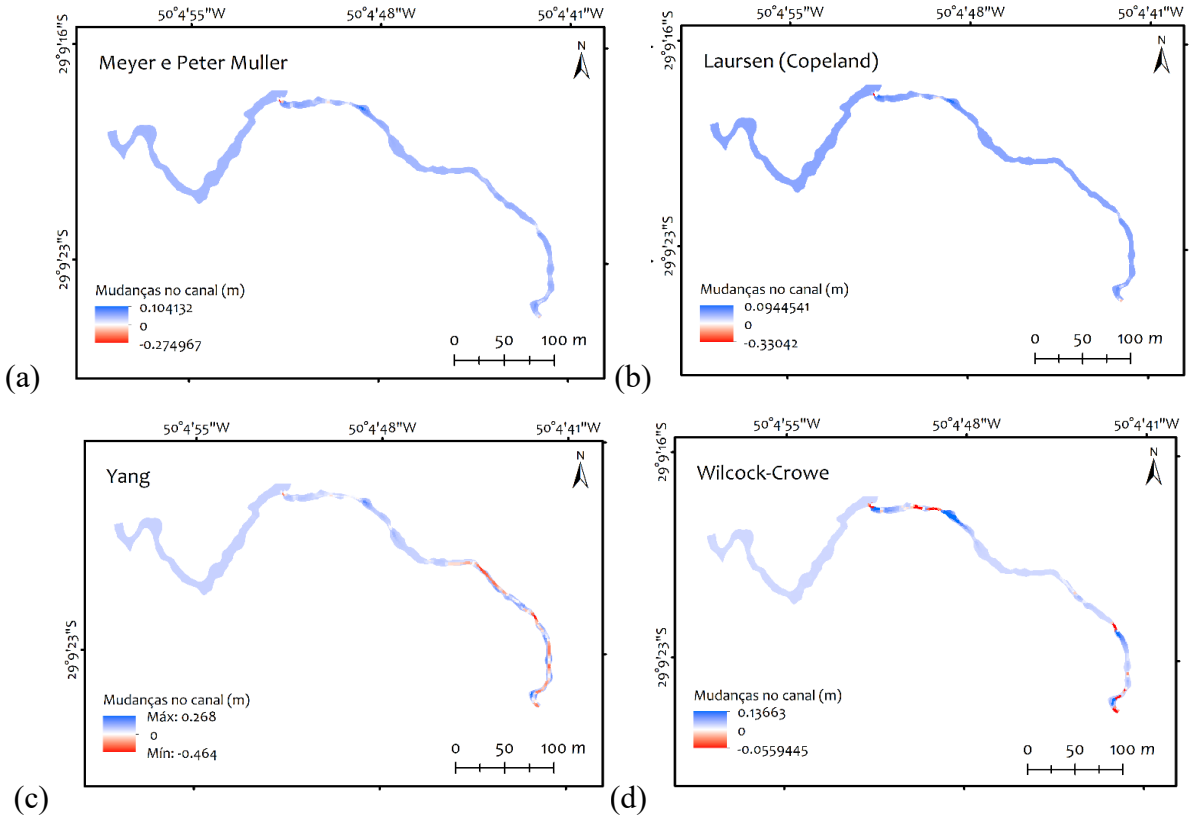
(a) (b)

Simulações 2D – Erosão e deposição

Na Figura 5 estão apresentados os mapas referentes às mudanças ocorridas no canal após a passagem da onda de cheia, obtidos por meio das simulações realizadas em 2D com quatro diferentes equações para representar o transporte de sedimentos. Pode-se constatar que a maior deposição e a maior erosão ocorrem ao utilizar a equação de Yang e são de aproximadamente 27 cm e 46 cm, respectivamente. Nesse caso, o canal apresentou uma tendência significativa de erosão na parte mais à jusante do trecho, que é onde o fluxo apresenta as maiores velocidades.

A simulação 2D_WC apresentou zonas pontuais de erosão do leito, que são os locais em que o leito do arroio é mais estreito. Nesse caso, os valores totais erodidos e assoreados foram bem menores do que na simulação 2D_YANG. Já as simulações 2D_MPM e 2D_LC apresentaram os resultados mais similares entre si, tanto em termos das magnitudes dos valores, quanto em relação aos locais que apresentam erosão/deposição. Em geral, comparando os resultados obtidos pelas quatro simulações realizadas, observa-se que o trecho simulado tem tendência de depositar sedimentos ao invés de erodir. Esses resultados apresentam-se como coerentes já que a velocidade máxima registrada no trecho que é de apenas 1,19 m/s e os seixos presentes no canal são relativamente mais grosseiros, ou seja, difíceis de serem transportados.

Figura 5 - Mudanças ocorridas no leito do arroio Perdizes ao longo do evento ocorrido entre os dias 5 e 15 de julho de 2020, considerando a simulação 2D e as diferentes equações, (a) Meyer e Peter Muller, (b) Laursen (Copeland), (c) Yang e (d) Wilcock-Crowe.

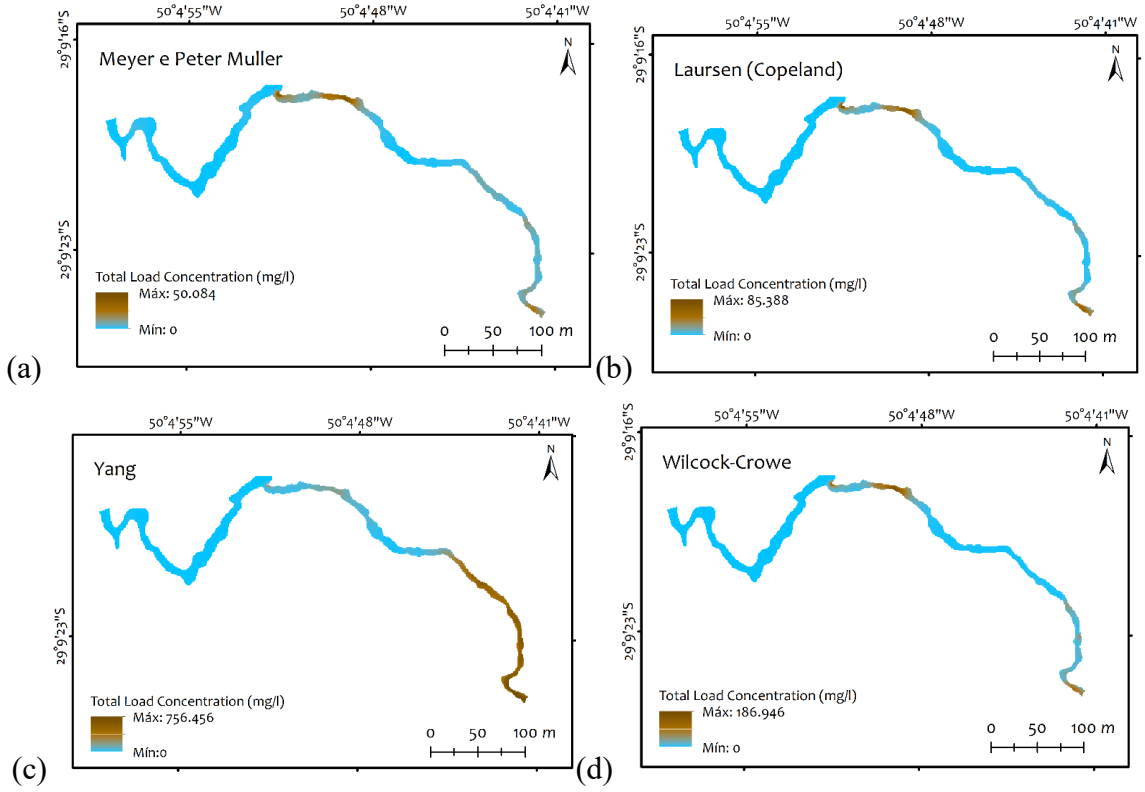


Simulações 2D – Massa total acumulada e concentração de sedimentos

Por meio da análise dos mapas da concentração da carga total de sedimentos (Figura 6) observa-se que ao utilizar as equações de MPM, LC e WC, as maiores concentrações de sedimentos são referentes à parte central do trecho simulado, bem como junto à foz do arroio. Sendo assim, as zonas de maiores concentrações são muito similares. Apesar disso, os valores absolutos são significativamente diferentes, variando entre um máximo de 50 mg/L na simulação 2D_MPM e 186 mg/L na simulação 2D_WC.

Entretanto, ao utilizar a equação de Yang, as maiores concentrações são referentes ao trecho final do canal. Ao analisar os valores totais, é possível perceber que a equação de Yang provavelmente superestima a concentração, já que o valor máximo obtido é de aproximadamente 756 mg/L, o que é bastante elevado ao comparar esse dado com a vazão e a velocidade máxima obtidas no trecho simulado (0,79 m³/s e 1,19 m/s). Apesar disso, a zona de maior concentração está coerente com o trecho em que foram obtidas as maiores velocidades do escoamento (Figura 3).

Figura 6 - Concentração da carga total do arroio Perdizes ao longo do evento ocorrido entre os dias 5 e 15/07/2020, considerando a simulação 2D e as diferentes equações, (a) Meyer e Peter Muller, (b) Laursen (Copeland), (c) Yang e (d) Wilcock-Crowe.



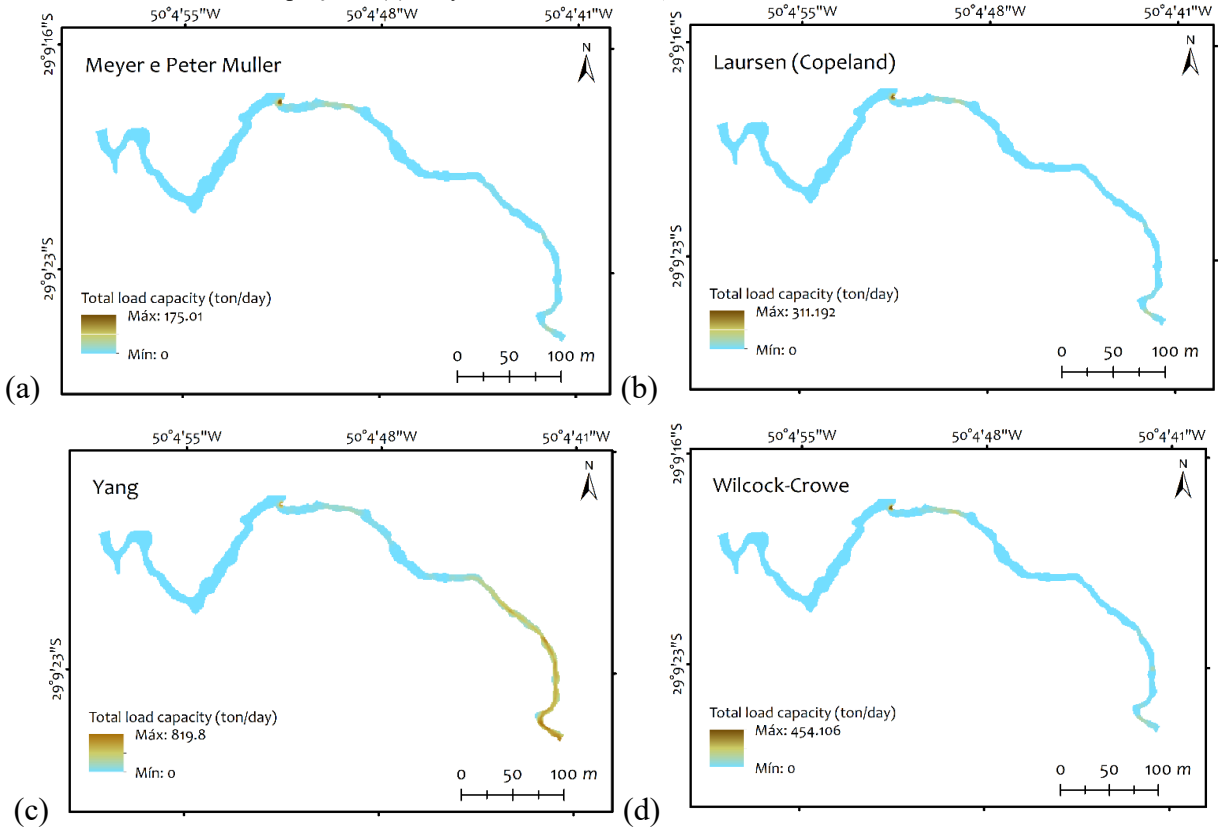
Simulações 2D – Carga total

A Figura 7 apresenta a capacidade de carga total nas simulações em 2D, de forma que a equação de Yang apresentou resultados mais distintos quando comparados com as demais equações, com as maiores cargas de transporte referentes a parte à jusante do trecho simulado, e também os valores mais elevados. As outras três simulações apresentaram resultados similares em termos das zonas de maiores capacidades de carga, mas as magnitudes máximas obtidas diferiram significativamente.

Comparação entre as simulações 1D e 2D

Considerando as diferentes equações aplicadas e as simulações em 1D e 2D, pode ser percebido que as equações de MPM e de LC foram as equações que forneceram os resultados mais similares entre si, tanto ao serem analisadas as zonas de maior transporte/sedimentação, quanto ao analisar os valores absolutos obtidos.

Figura 7 - Capacidade de carga total do arroio Perdizes ao longo do evento ocorrido entre os dias 5 e 15/07/2020, considerando as diferentes equações, (a) Meyer e Peter Muller, (b) Laursen (Copeland), (c) Yang e (d) Wilcock-Crowe.



Nas simulações em 1D, os resultados obtidos a partir da equação de Yang também foram similares aos resultados das equações de MPM e de LC. Entretanto, para o caso das simulações em 2D, os resultados diferiram significativamente. Isso pode ser consequência de algum parâmetro, adotado de forma diferente para as simulações realizadas em 1D e em 2D, já que na versão utilizada do *software* os parâmetros das simulações do transporte de sedimentos para 1D e para 2D não foram os mesmos (USACE-RAS, 2020b).

O mesmo ocorre para as simulações realizadas com a equação de WC, que responderam de forma diferente ao ser utilizado o módulo 1D e o módulo 2D de sedimentos. Entretanto, nesse caso, os resultados das simulações em 1D foram mais discrepantes do que os demais. Já nas simulações em 2D os resultados obtidos por meio do uso dessa equação foram bem similares aos obtidos com as equações de MPM e de LC.

Assim sendo, pode-se dizer que as simulações do transporte de sedimentos são muito sensíveis aos dados de entrada e aos parâmetros adotados. Ao utilizar diferentes equações do transporte, os resultados apresentaram grandes discrepâncias, mesmo que todas as equações tenham sido consideradas como adequadas à granulometria e as condições do fluxo do arroio Perdizes. Isso indica a dificuldade de escolher uma equação para simular o transporte de sedimentos em um rio, já que a maioria das equações disponíveis são empíricas e foram desenvolvidas tomando como base rios ou canais com características específicas.

CONCLUSÕES

A simulação do transporte de sedimentos em rios representa um grande desafio, especialmente pela variedade de equações existentes, cada uma desenvolvida para contextos geomorfológicos específicos. Este estudo mostrou que diferentes equações, mesmo sendo compatíveis com as características do arroio Perdizes, geraram resultados distintos no modelo.

As simulações em 1D e 2D revelaram relevantes com as equações de Yang e Wilcock-Crowe, enquanto os resultados das simulações realizadas com a equação de Meyer e Peter Muller e com a equação de Laursen e Copeland foram muito simulares para 1D e 2D. Isso evidencia que a escolha da equação de transporte, da velocidade de queda e do método de classificação deve considerar as características locais do sedimento e do fluxo, preferencialmente com base em aplicações anteriores em rios similares. Ressalta-se a importância do monitoramento de campo de variáveis como vazão, granulometria e concentração de sedimentos em suspensão, para validar a coerência dos resultados simulados. Por fim, destaca-se que, neste caso, não foi possível validar os cenários por ausência de dados observados, sendo as análises comparativas entre equações e domínios a principal abordagem adotada.

Agradecimentos – Os autores desse trabalho agradecem à CAPES e ao CNPq pelas bolsas de pesquisa.

REFERÊNCIAS

BUARQUE, D.C. (2015). *"Simulação da geração e do transporte de sedimentos em grandes bacias: Estudo de caso do rio Madeira."*. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.
.
CAMPAGNOLO, K**.** (2021). "*Influência dos detritos lenhosos na dinâmica fluvial de um rio de cabeceira em Floresta de Araucária"*. 141 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.
CAMPAGNOLO, K.; KOBIYAMA, M.; FAGUNDES, M.R.; MENEZES, D.; IROUMÉ, A.; MICHEL, G.P.; RODRIGUES, M.F. (2024). "*Influence of large wood dynamics on flow and channel morphology in a forest stream.*" Geomorphology 459 (109268).
CAMPANA, K.D.S. *Simulação do transporte de sedimentos em trecho do rio Doce (ES) utilizando modelagem computacional*. 2018. 127 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico, Vitória, 2018.
JARRETT, R.D. (1984). *"Hydraulics of high gradient streams"*. ASCE Journal of Hydraulic Engineering 110 (11).
MUSTAFA, A.S.; SULAIMAN, S.O.; AL_ALWANI, K.M. (2017). "*Application of HEC-RAS model to predict sediment transport for Euphrates River from Haditha to Heet 2016*". Al-Nahrain Journal for Engineering Sciences 20 (3), p. 570-577.
USACE-RAS. (2020a). *"River Analysis System, HEC-RAS v6.0 – User's Manual – Sediment Transport."* US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center. 356 p.
USACE-RAS. (2020b). *"River Analysis System, HEC-RAS v6.0 – Two-Dimensional Sediment Transport User's Manual"*. US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center. 89 p.
USACE-RAS. (2021). *"River Analysis System, HEC-RAS v6.0 – User's Manual."* US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center. 705 p.
YANG, C.T. & SIMÕES, F.J.M. (2008). *"GSTARS computer models and their applications. Part I: Theoretical development."* International Journal of Sediment Research, 23 (3), pp. 197-211.