

XXIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

AVALIAÇÃO DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS DE FUNDO POR MEIO DA PINTURA DE SEDIMENTOS GROSSEIROS EM RIO PEDREGOSO

Danrlei de Menezes^{1}; Masato Kobiyama²; Hannah Uruga³ & Maurício de Lucca⁴*

Resumo– Os rios montanhosos são agentes de erosão e transporte de sedimentos. No entanto, os processos hidrossedimentológicos nesses locais ainda são pouco conhecidos, principalmente no Brasil. Nesse sentido, o objetivo principal desse trabalho foi avaliar se a mobilidade de sedimentos de fundo de um rio pedregoso pode ser estimada por meio da pintura de sedimentos. Para isso foi utilizado o rio Forqueta, em Maquiné/RS, de característica de leito pedregoso e alta velocidade do escoamento. Foi realizado o monitoramento da precipitação, vazão, sedimentos de fundo e hidráulica de um trecho do rio. O monitoramento do transporte de sedimentos de fundo envolveu a pintura de 80 partículas, que foram divididas em quatro seções de faixas granulométricas diferentes (32-64 mm; 64-128 mm; 128-256 mm; 256-512 mm). Após determinados períodos, a distância percorrida por cada partícula foi anotada e realocada na posição inicial. Os resultados indicaram que a vazão máxima ($Q_{máx}$) responsável por mobilizar os sedimentos pintados correspondeu a vazão de 14,11 m³/s. Ainda, a $Q_{máx}$ apresentou a melhor correlação (exponencial) dentre as variáveis hidrológicas intraeventos de chuva ($R^2=0,94$). A técnica de pintura de sedimentos se mostrou eficaz para monitorar a distância percorrida pelos sedimentos por se tratar de uma técnica simples e econômica, no entanto, ela não é indicada para monitorar sedimentos de granulometria menor que 64 mm.

Palavras-Chave – Rio montanhoso; monitoramento hidrossedimentológico; sedimentos de fundo.

INTRODUÇÃO

O transporte de sedimentos é um componente essencial da dinâmica do rio sendo muitas vezes responsável pela erosão e evolução de formas do leito. Em rios com leito pedregoso (*gravel-bed river*), o transporte de sedimentos é difícil de medir com precisão devido à alta heterogeneidade de tamanhos dos sedimentos e topografia de canal complexa com diferentes unidades geomórficas. Isso é intensificado durante eventos de inundação, quando ocorre a maior parte do transporte de sedimentos de fundo (RYAN e DIXON, 2007; MAO, 2018).

Além disso, como os amostradores de carga de fundo são normalmente utilizados manualmente ou dentro do leito do rio, a alta variabilidade espacial do transporte de carga de fundo e os movimentos esporádicos de frações grosseiras são difíceis de quantificar (FERGUSON *et al.*, 2002). Por esta razão, traçadores têm sido usados em campo para medir a distância percorrida por partículas individuais (HASSAN *et al.*, 1992; PYRCE e ASHMORE, 2003). O deslocamento dos traçadores quando combinado com o monitoramento da vazão e levantamento de seção transversal, podem ser

¹ Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS); e-mail: d.menezes18@gmail.com

² Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS); e-mail: masato.kobiyama@ufrgs.br

³ Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS); e-mail: hannaholiv@gmail.com

⁴ Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS); e-mail: delucca.mauricio@gmail.com

utilizados para calcular o transporte de carga de fundo (WILCOCK, 1997; LIÉBAULT e LARONNE, 2008).

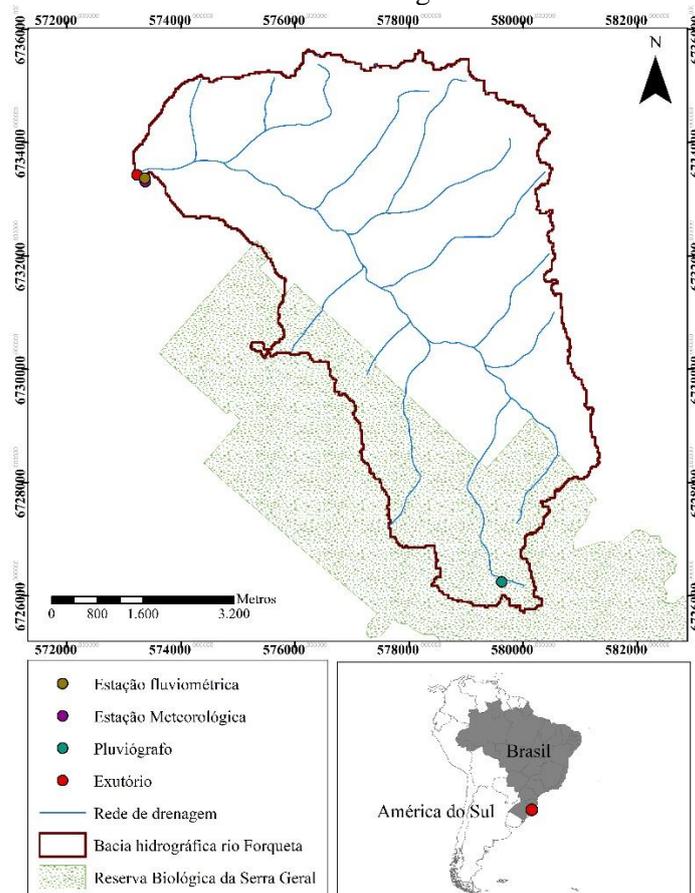
Vários tipos de traçadores de sedimentos foram usados em ambientes fluviais, variando de partículas pintadas (HASSAN *et al.*, 1992; LENZI, 2004), traçadores magnéticos passivos (ASHWORTH e FERGUSON, 1989) partículas transmissoras de rádio (HABERSACK, 2001) e transponders integrados passivos (LAMARRE *et al.*, 2005). A pintura de sedimentos pode ser utilizada por se tratar de uma técnica simples e econômica que permite o uso de um grande número de partículas e não tem limitações no tamanho mínimo de grão. Entretanto, trabalhos como este com dados de campo são raramente encontrados na literatura.

Assim, o objetivo deste artigo foi avaliar se a mobilidade de sedimentos de fundo de um rio pedregoso pode ser estimada por meio da pintura de sedimentos. Para isso, foi utilizado um trecho do rio Forqueta (Maquiné/RS) para instalação do experimento que já possui monitoramento da vazão. Desse modo, investigou-se a relação entre o transporte de sedimentos de fundo e as variáveis hidrológicas intraeventos.

MATERIAIS E MÉTODOS

O trecho de análise do rio Forqueta ($Q_{méd} = 2,0\text{m}^3/\text{s}$) está situado no exutório da bacia hidrográfica que leva o mesmo nome do rio ($A = 46\text{ km}^2$) (Figura 1) e se localiza no município de Maquiné, na região nordeste do estado do Rio Grande do Sul. Nesse município, destaca-se o turismo na Cascata da Forqueta que é um grande atrativo da localidade e que recebe inúmeros visitantes ao longo de todo o ano para contemplação e realização de trilhas (G1/GLOBO, 2013).

Figura 1 - Localização da bacia hidrográfica do rio Forqueta e distribuição espacial dos equipamentos hidrometeorológicos.



Devido a características montanhosas como alta declividade e velocidade do escoamento, em dias chuvosos, o aumento repentino do nível de água, traz consigo diferentes granulometrias de sedimentos. Este fato por muitas vezes afeta a população local e turistas, impedindo a sua locomoção e expondo-os ao perigo.

Por isso, é importante o monitoramento nesses locais. Sendo assim, o Grupo de Pesquisas em Desastres Naturais (GPDEN) do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), vem realizando o monitoramento do nível deste rio desde 2019. Associado a ele, foi investigada a mobilidade dos sedimentos de fundo deste rio por meio da pintura de determinadas granulometrias de sedimentos.

Monitoramento hidrológico

Para o monitoramento da chuva foi utilizado um pluviógrafo instalado dentro da Reserva Biológica da Serra Geral (REBIO) – na cabeceira da bacia. Já a estação meteorológica foi instalada próxima ao exutório da bacia, junto a uma pousada que recebe turistas ao longo do ano. Para monitorar a vazão foi utilizado um sensor de nível instalado no rio Forqueta no exutório da bacia. Acoplado a ele, régua milimétrica para aferição do sensor. O sensor de pressão registra o nível d'água em intervalos constantes de 10 minutos por meio de um *datalogger*. O valor registrado pelo sensor (miliVolts) é transformado em nível d'água (centímetros) por meio de uma equação, previamente calibrada. A distribuição espacial desses equipamentos foi mostrada na Figura 1. Os valores de nível d'água (H) em centímetros foram novamente manipulados, para obtenção do valor da vazão (Q) por meio de uma curva-chave:

$$Q = 0,000234.H^{2,226547} \quad (1)$$

Monitoramento dos sedimentos

Para medir o transporte de sedimentos de fundo foi utilizada a pintura dos sedimentos. O procedimento consistiu em, primeiramente, coletar os sedimentos de cada faixa granulométrica representativa do fundo do canal e calcular o seu diâmetro nominal (D_n). Após secos e contabilizados, foram pintados 20 sedimentos de cada faixa granulométrica sendo: 32-64 mm; 64-128 mm; 128-256 mm; e 256-512 mm. Essas faixas foram escolhidas porque são representativas do canal e, além disso, menores faixas seriam praticamente impossíveis de encontrar pós-evento de inundação. Assim, preferiu-se padronizar e escolher essas faixas granulométricas.

As 80 unidades foram dispostas em quatro seções, divididas por faixas granulométricas (20 unidades por seção). Na Figura 2 são demonstrados detalhadamente o esquema das seções analisadas e a medição *in loco*. As quatro seções estão distantes cinco metros uma da outra e, aproximadamente, a 170 m montante do exutório da bacia. Cada cor representou uma faixa granulométrica, assim, pós-evento, foi mais fácil encontrá-las no canal. Ao todo foram pintados 80 sedimentos no dia 26/08/2020 e realizado quatro campanhas de monitoramento: 1ª campanha/pintura (26/08/2020); 2ª campanha (22/09/2020); 3ª campanha (21/12/2020) e 4ª campanha (26/03/2021) (Figura 3).

Após cada inspeção, a distância percorrida por cada partícula foi medida e anotada, incluindo as que não se moveram. Após cada campanha, elas foram recolocadas na posição inicial e iniciava-se outra campanha pois estavam disponíveis para serem transportadas por outro evento de chuva. Usando esta metodologia, o movimento de cada partícula foi analisado em relação à sua dimensão e a $Q_{máx}$ do período.

Além disso, foi calculada a potência do escoamento - *stream power* (Ω) máxima utilizando a mesma abordagem proposta em Magilligan; Buraas e Renshaw (2014).

$$\Omega = \gamma \cdot Q_{máx} \cdot S \quad (2)$$

onde Ω é a potência máxima do escoamento (W); γ é o peso específico do fluido (N/m^3); e S é a declividade da linha d'água (m/m).

Assim, foi possível comparar as variáveis hidrológicas como precipitação (P), vazão média ($Q_{méd}$), $Q_{máx}$ e Ω - com as distâncias e diâmetros dos sedimentos mobilizados.

Figura 2 - Disposição dos sedimentos pintados no canal no dia 26/08/2020

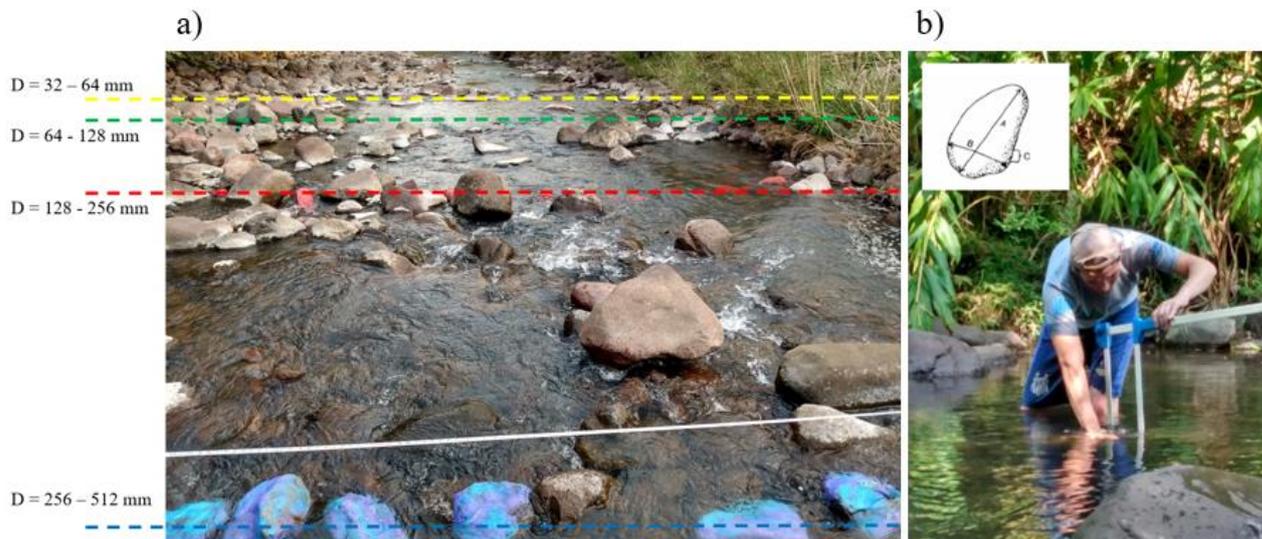
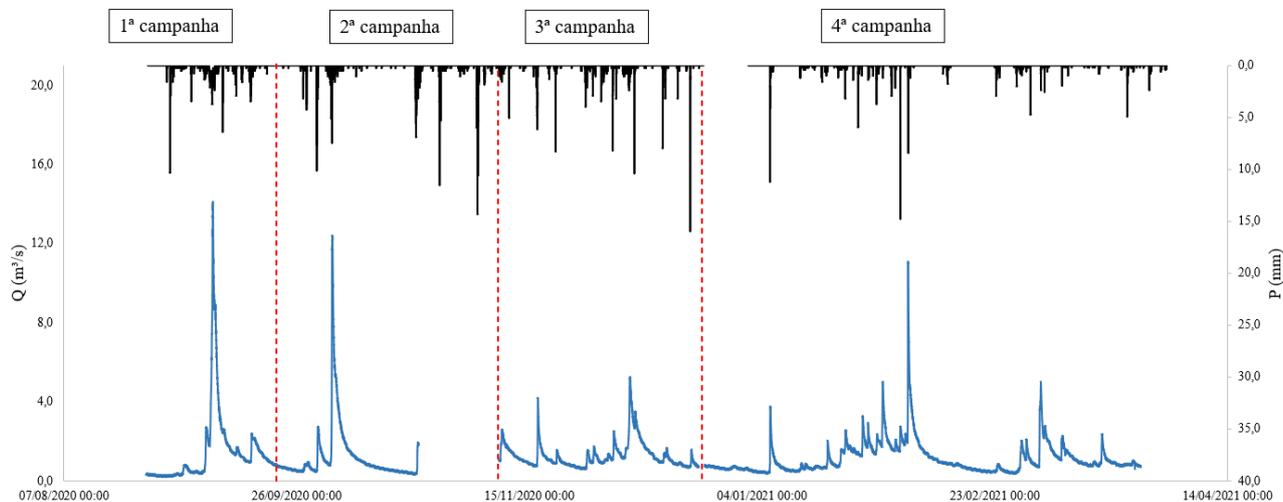


Figura 3 – Fluviograma do período monitorado



Caracterização dos sedimentos de fundo

Os sedimentos tiveram seus eixos (A , B e C) medidos por meio de um paquímetro, para diâmetros menores que 10 cm, e uma suta (Mantax Blue - 950mm), para os maiores (>10 cm) (Figura 2b). Em seguida, o diâmetro nominal (D_n) (mm) foi calculado para cada sedimento.

$$D_n = (A \cdot B \cdot C)^{\frac{1}{3}} \quad (3)$$

onde A é o maior diâmetro (mm); B é o diâmetro intermediário (mm); e C é o menor diâmetro (mm). Sedimentos menores que 2 mm de diâmetros não foram medidos aqui, pois assumimos que estes não são transportados como sedimentos de fundo (HARRIES *et al.*, 2019) e sua aparição no leito foi praticamente incomum.

As campanhas de caracterização dos sedimentos de fundo e da batimetria da seção foram realizadas por estações do ano. Assim, foram divididas em inverno, primavera, verão e outono para observar a variação sazonal do comportamento dos sedimentos de fundo e inferir sobre a estabilidade do canal.

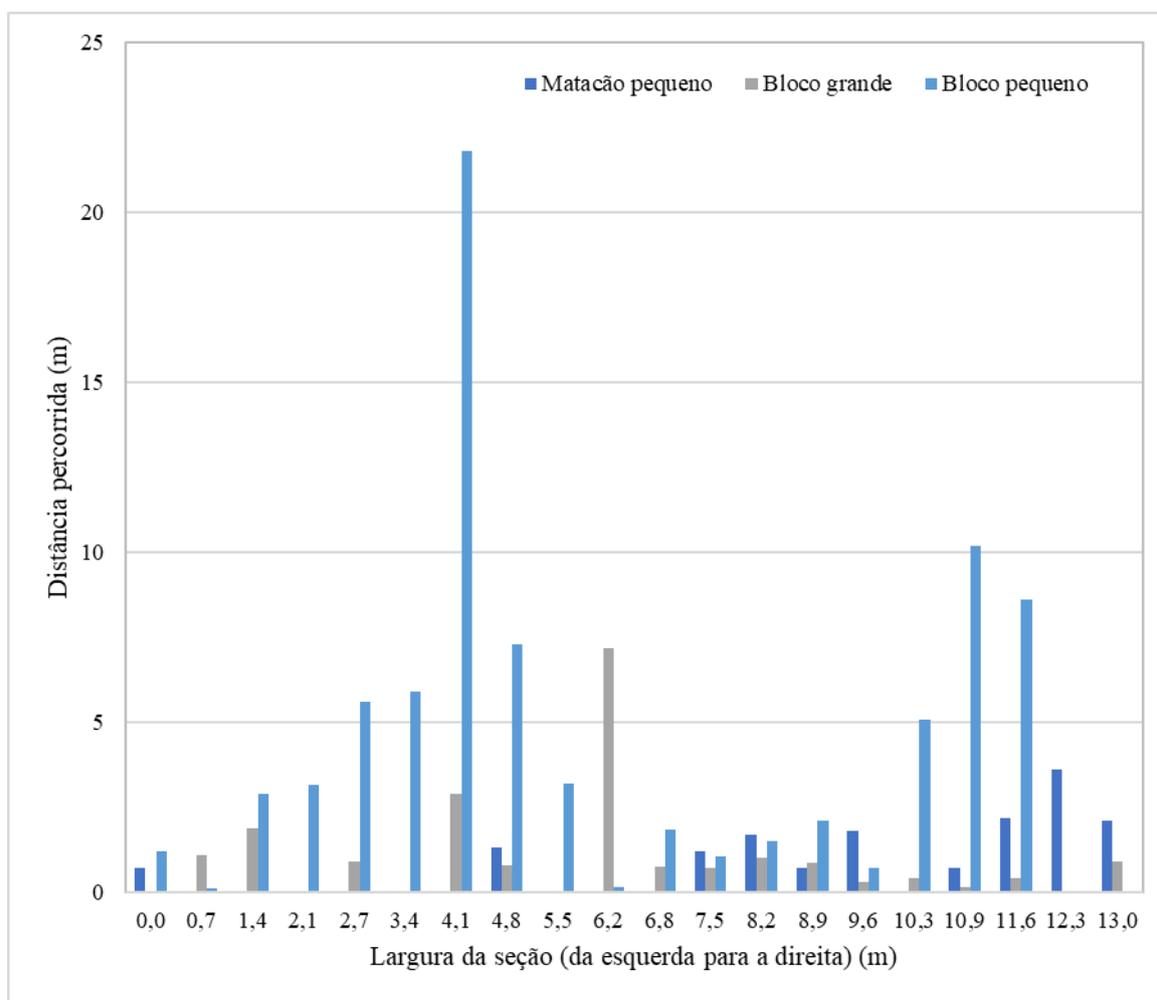
RESULTADOS E DISCUSSÃO

Distâncias percorridas pelos sedimentos

Os menores diâmetros dos sedimentos transportados resultaram em valores maiores de distâncias em todas as campanhas. Inclusive, a menor granulometria monitorada (32-64 mm) foi desconsiderada da análise já que a maioria das partículas foi transportada e/ou não foi encontrada já na primeira campanha. Essas partículas provavelmente foram soterradas por outras partículas maiores, inviabilizando a visualização do observador.

Na Figura 4 observa-se o movimento dos sedimentos considerando suas granulometrias e distribuição na seção transversal para o período de 26/08/2020 à 22/09/2020 (1ª campanha).

Figura 4 - Distâncias percorridas dos sedimentos por localização no canal (período 26/08/20 - 22/09/2020)



Na Tabela 1 são resumidas as distâncias percorridas nos diferentes períodos e pelos diferentes tamanhos de sedimentos. Destaca-se que a maior distância percorrida foi de 21,80 m por um bloco pequeno (D=64-128 mm). Já a maior distância percorrida pelo maior diâmetro analisado (matacão

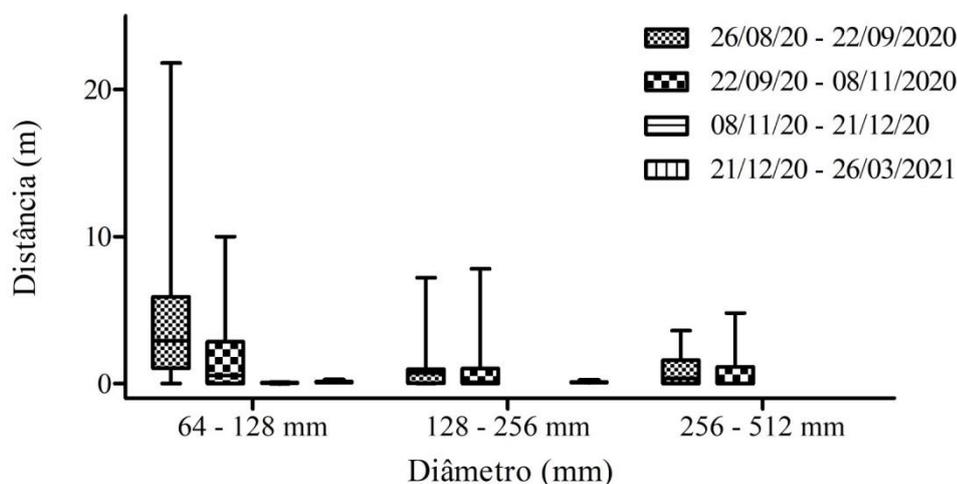
pequeno - $D=256-512$ mm) foi de 4,80 m. É esperada a diminuição da distância média percorrida pelas partículas com o aumento do tamanho do grão (FERGUSON e WHATEN, 1998).

Tabela 1 - Distâncias percorridas pelos sedimentos monitorados

| Período | | Matacão pequeno | Bloco grande | Bloco pequeno |
|---------------------|--------|----------------------------|--------------|---------------|
| | | Distâncias percorridas (m) | | |
| 26/08/20 - 22/09/20 | Média | 0,80 | 1,01 | 4,34 |
| | Máxima | 3,60 | 7,20 | 21,80 |
| 22/09/20 - 08/11/20 | Média | 0,67 | 0,91 | 2,54 |
| | Máxima | 4,80 | 7,80 | 10,00 |
| 08/11/20 - 21/12/20 | Média | 0,00 | 0,00 | 0,04 |
| | Máxima | 0,00 | 0,00 | 0,60 |
| 21/12/20 - 26/03/21 | Média | 0,00 | 0,12 | 0,17 |
| | Máxima | 0,00 | 1,45 | 1,80 |

Na Figura 5 é apresentado um *box plot* com as variações das distâncias percorridas por cada tamanho de sedimento para melhor visualização do comportamento das partículas para cada período. Observou-se que as maiores medianas ocorreram no primeiro período de campanha que, coincidiu com o maior valor de vazão registrada ($14,11 \text{ m}^3/\text{s}$), mesmo o período não apresentando as maiores taxas de precipitação (Tabela 2).

Figura 5 – *Box-plot* das distâncias percorridas por tamanho dos sedimentos



Relação entre o transporte de sedimentos e variáveis hidrológicas

Comparando a $Q_{máx}$ e as distâncias percorridas pelos sedimentos pintados, observamos que a $Q_{máx}$ do período de 08/11/20 – 21/12/20 ($5,26 \text{ m}^3/\text{s}$) não gerou movimento para matacões pequenos ($D=256-512$ mm) e nem para blocos grandes ($D=128-256$ mm). Já a $Q_{máx}$ do período de 21/12/20 – 26/03/2021 ($11,10 \text{ m}^3/\text{s}$) gerou movimento apenas para os matacões pequenos. A $Q_{máx}$ do período de 26/08/20 - 22/09/20 ($14,11 \text{ m}^3/\text{s}$) foi a única que coincidiu com o transporte de todas as granulometrias dos sedimentos. Na Tabela 2 é apresentado um resumo dos dados hidrológicos entre os períodos monitorados. No período de 22/09/2020 a 08/11/2020 houve falha no sensor de nível.

Tabela 2 - Variáveis hidrológicas entre os períodos monitorados

| Variáveis | 26/08/20 - 22/09/2020 | 22/09/20 - 08/11/2020 | 08/11/20 - 21/12/20 | 21/12/2021 - 26/03/2021 |
|-------------------------------|--------------------------|--------------------------|------------------------|----------------------------|
| $Q_{méd}$ (m ³ /s) | 1,39 | - | 1,28 | 1,11 |
| $Q_{máx}$ (m ³ /s) | 14,11 | - | 5,26 | 11,10 |
| Tempo (dias) | 28,96 | - | 42,85 | 93,71 |
| P (mm) | 442,28 | 672,04 | 553,05 | 359,16 |
| Ω (W) | 6918,98 | - | 2579,31 | 5445,04 |

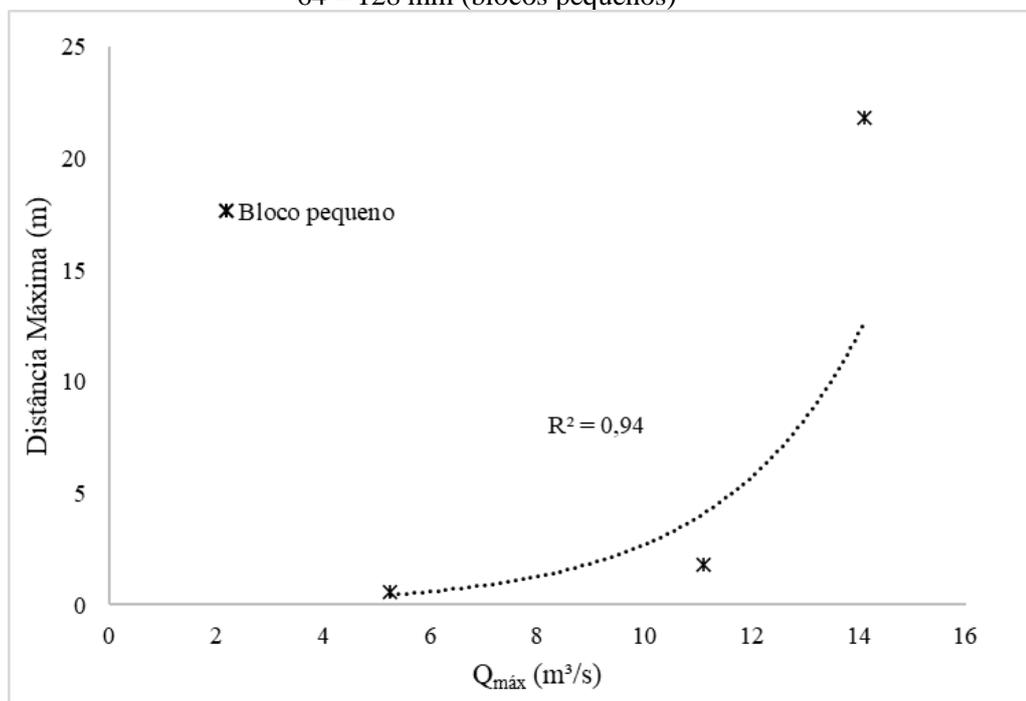
Esses resultados destacam que o transporte parcial desempenha um papel importante, especialmente durante eventos de baixa magnitude, enquanto o transporte completo é o mecanismo de mobilização de sedimentos dominante durante inundações de alta magnitude. Resultados similares foram encontrados por Brenna; Surian e Mao (2020), Mao *et al.* (2017) e Haschenburger e Wilcock (2003).

Para representar melhor a relação entre as variáveis hidrológicas e as distâncias percorridas pelos sedimentos pintados, selecionamos a variável que possuiu a melhor correlação com a distância máxima percorrida por esses sedimentos. Neste caso, por meio de uma relação exponencial, a $Q_{máx}$ e a distância máxima percorrida pelos sedimentos de granulometria blocos pequenos obtiveram $R^2 = 0,94$, representados pela Equação (4).

$$\text{Dist máx} = 0,0627 \cdot \exp(0,3763 \cdot Q_{máx}) \quad (4)$$

Na Figura 6 é apresentada essa relação apenas para a granulometria referente a bloco pequenos (64-128 mm). As demais equações para bloco grande e matacão pequeno não foram geradas porque ou não houve movimento ou o sensor de nível apresentou falha no período (conforme consta nas Tabelas 1 e 2), impossibilitando assim a geração de uma equação.

Figura 6 - Relação entre $Q_{máx}$ e distância máxima percorrida pelos sedimentos pintados para granulometria 64 – 128 mm (blocos pequenos)



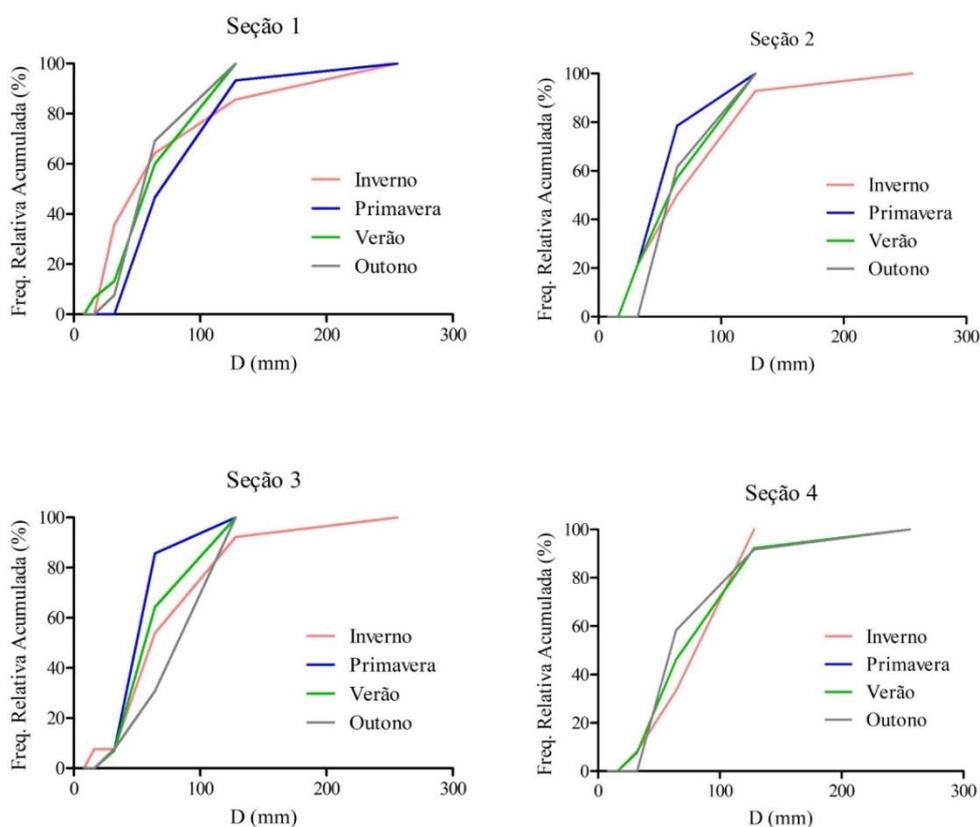
É importante destacar que as partículas transportadas são geralmente mais finas do que os sedimentos pintados monitorados neste e em outros (MAO; SURIAN, 2010). Isso porque pintar

partículas menores que 64 mm é extremamente trabalhoso e existem outros métodos e materiais (por exemplo: Muhammad *et al.*, 2019) para monitorar essa granulometria em rios naturais. Assim, as partículas menores que 64 mm podem ser entendidas como transportadas pelos fluxos observados. Para Mao e Surian (2010) também assumiram tal característica em seu trabalho. A diferença é que esse valor foi de 32 mm e foi realizado o monitoramento de sedimentos pintados em um rio inserido em uma bacia hidrográfica de 2580 km².

Evolução do fundo do canal

Na Figura 7 são apresentadas as distribuições granulométricas das quatro seções onde foram dispostos os sedimentos pintados (seções 1, 2, 3 e 4 – de jusante para montante) e como ocorreu a variação dos valores dos diâmetros dos sedimentos de fundo nesses diferentes períodos. O D_{50} diminuiu em quase todas as seções no período (menos na seção 1). No entanto, não se observa uma tendência de comportamento ou mudança (erosão ou deposição na seção). De acordo com Hassan et al. (2020), a mudança do canal geralmente ocorre quando há algum evento extremo ou há um fornecimento de sedimentos.

Figura 7 - Distribuição granulométrica em cada seção ao longo do ano



CONCLUSÕES

A análise dos dados das distâncias percorridas pelos sedimentos destacou que o transporte de algumas partículas desempenha um papel importante, especialmente durante eventos de baixa magnitude de vazão. Enquanto o transporte de um maior número de partículas pode ser o mecanismo de mobilização de sedimentos dominante durante inundações de alta magnitude. No entanto, mesmo ocorrendo esse transporte de sedimentos de fundo não houve alteração significativa do material do leito.

Por outro lado, o monitoramento por meio da pintura de sedimentos possui uma baixa taxa de recuperação das partículas, especialmente para as partículas menores (LARONNE e CARSON, 1976), e não pode ser empregado de forma viável para rastrear o transporte de sedimentos de fundo de inundações de alta magnitude e por longos períodos (SCHMIDT e ERGENZINGER, 1992). Assim, tecnologias complementares são indicadas para este tipo de ambiente (fundo pedregoso e alta velocidade do escoamento), como o uso de *Passive Integrated Transponder* (PIT) para facilitar o rastreamento dessas partículas (RAINATO *et al.*, 2018).

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a equipe da Secretaria do Meio Ambiente do estado do Rio Grande do Sul (SEMA-RS) / REBIO (Maquiné/RS) pelo suporte fornecido e ao Sr. Lucas Nunes de Souza pelo apoio fornecido nas atividades de campo. Ainda, os autores agradecem ao apoio financeiro fornecido pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Programa de apoio ao Ensino e à Pesquisa Científica e Tecnológica em Regulação e Gestão de Recursos Hídricos – Pró-Recursos Hídricos - Chamada N° 16/2017, CAPES - ANA.

REFERÊNCIAS

- Ashworth, P. J., & Ferguson, R. I. (1989). *Size-selective entrainment of bed load in gravel bed streams*. *Water Resources Research*, 25(4), 627-634.
- Ferguson, R. I., Bloomer, D. J., Hoey, T. B., & Werritty, A. (2002). *Mobility of river tracer pebbles over different timescales*. *Water Resources Research*, 38(5), 3-1.
- Ferguson, R. I., & Wathen, S. J. (1998). *Tracer-pebble movement along a concave river profile: Virtual velocity in relation to grain size and shear stress*. *Water Resources Research*, 34(8), 2031-2038.
- G1/GLOBO. Cascatas do Garapiá e da Forqueta atraem visitantes a Maquiné, RS. 2013. Disponível em: <<http://g1.globo.com/rs/rio-grande-do-sul/nossa-terra/2012/noticia/2013/01/cascatas-do-garapia-e-da-forqueta-atraem-visitantes-maquine-rs.html>> Acesso em: 22 de maio de 2021.
- Habersack, H. M. (2001). *Radio-tracking gravel particles in a large braided river in New Zealand: A field test of the stochastic theory of bed load transport proposed by Einstein*. *Hydrological Processes*, 15(3), 377-391.
- Harries, R. M., Kirstein, L. A., Whittaker, A. C., Attal, M., & Main, I. (2019). *Impact of recycling and lateral sediment input on grain size fining trends—Implications for reconstructing tectonic and climate forcings in ancient sedimentary systems*. *Basin Research*, 31(5), 866-891.
- Haschenburger, J. K., & Wilcock, P. R. (2003). *Partial transport in a natural gravel bed channel*. *Water Resources Research*, 39(1).
- Hassan, M. A., Church, M., & Ashworth, P. J. (1992). *Virtual rate and mean distance of travel of individual clasts in gravel-bed channels*. *Earth Surface Processes and Landforms*, 17(6), 617-627.
- Hassan, M. A., Saletti, M., Zhang, C., Ferrer-Boix, C., Johnson, J. P., Müller, T., & von Flotow, C. (2020). *Co-evolution of coarse grain structuring and bed roughness in response to episodic sediment supply in an experimental aggrading channel*. *Earth Surface Processes and Landforms*, 45(4), 948-961.
- Lamarre, H., MacVicar, B., & Roy, A. G. (2005). *Using passive integrated transponder (PIT) tags to investigate sediment transport in gravel-bed rivers*. *Journal of Sedimentary Research*, 75(4), 736-741.
- Laronne, J. B., & Carson, M. A. (1976). *Interrelationships between bed morphology and bed-material transport for a small, gravel-bed channel*. *Sedimentology*, 23(1), 67-85.
- Lenzi, M. A. (2004). *Displacement and transport of marked pebbles, cobbles and boulders during floods in a steep mountain stream*. *Hydrological processes*, 18(10), 1899-1914.

- Liébault, F., & Laronne, J. B. (2008). *Evaluation of bedload yield in gravel-bed rivers using scour chains and painted tracers: the case of the Esconavette Torrent (Southern French Prealps)*. *Geodinamica Acta*, 21(1-2), 23-34.
- Magilligan, F. J., Buraas, E. M., & Renshaw, C. E. (2015). *The efficacy of stream power and flow duration on geomorphic responses to catastrophic flooding*. *Geomorphology*, 228, 175-188.
- Mao, L. (2018). *The effects of flood history on sediment transport in gravel-bed rivers*. *Geomorphology*, 322, 196-205.
- Mao, L., Picco, L., Lenzi, M. A., & Surian, N. (2017). *Bed material transport estimate in large gravel-bed rivers using the virtual velocity approach*. *Earth Surface Processes and Landforms*, 42(4), 595-611.
- Mao, L., & Surian, N. (2010). *Observations on sediment mobility in a large gravel-bed river*. *Geomorphology*, 114(3), 326-337.
- Muhammad, N., Adnan, M. S., Yosuff, M. A. M., & Ahmad, K. A. (2019). *A review of field methods for suspended and bedload sediment measurement*. *World Journal of Engineering*.
- Pyrce, R. S., & Ashmore, P. E. (2003). *The relation between particle path length distributions and channel morphology in gravel-bed streams: a synthesis*. *Geomorphology*, 56(1-2), 167-187.
- Rainato, R., Mao, L., & Picco, L. (2018). *Near-bankfull floods in an Alpine stream: Effects on the sediment mobility and bedload magnitude*. *International journal of sediment research*, 33(1), 27-34.
- Ryan, S. E., & Dixon, M. K. (2007). *15 Spatial and temporal variability in stream sediment loads using examples from the Gros Ventre Range, Wyoming, USA*. *Developments in Earth Surface Processes*, 11, 387-407.
- Schmidt, K. H., & Ergenzinger, P. (1992). *Bedload entrainment, travel lengths, step lengths, rest periods—studied with passive (iron, magnetic) and active (radio) tracer techniques*. *Earth Surface Processes and Landforms*, 17(2), 147-165.
- Wilcock, P. R. (1997). *Entrainment, displacement and transport of tracer gravels*. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Group*, 22(12), 1125-1138.