

Artigo de Pesquisa

Análise das taxas de sedimentação do rio Jacuí entre Vale Verde e São Jerônimo - Bacia hidrográfica do Baixo Jacuí (Rio Grande do Sul, Brasil)

Analysis of Jacuí river sedimentation rates between Vale Verde and São Jerônimo - Baixo Jacuí watershed (Rio Grande do Sul, Brazil)

Igor Sieczkowski MOREIRA¹ , Rossana Vicente GOULART²  & Fernando Mainardi FAN³ 

¹Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, Porto Alegre, Brasil. igorsiecz@hotmail.com.

²Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler, Divisão de Monitoramento Ambiental, Porto Alegre, Brasil. rossana-goulart@fepam.rs.gov.br.

³Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Porto Alegre, Brasil. fernando.fan@ufrgs.br.

Resumo: Este trabalho objetiva comparar metodologias para a investigação do transporte de sedimentos no rio Jacuí, e assim apontar qual melhor se aplica enquanto ferramenta de gestão ambiental. Para tal, foram calculadas as taxas de sedimentação por três métodos: descarga de sólidos, diferença de cubagens e modelagem hidrossedimentológica. No primeiro, as taxas de sedimentação foram obtidas pela diferença de transporte de sedimentos entre seções. No segundo, foram calculadas para diferentes trechos de extração mineral por meio da diferença de volumes de sedimentos. Por fim, foi realizado o modelamento computacional de sedimentos do trecho entre Vale Verde e Amarópolis para o período de 2012 a 2019, o qual indicou predominância de sedimentação na região. Os primeiros métodos foram comparados qualitativamente com o modelo. Concluiu-se que o método da diferença de cubagens é a ferramenta mais adequada, simples e eficaz o objetivo proposto.

Palavras-chave: Transporte de sedimentos; modelagem hidrossedimentológica; erosão; gestão ambiental.

Abstract: This study aims to compare methodologies for investigating sediment transport in the Jacuí River and determine the most suitable approach as an environmental management tool. For this purpose, sedimentation rates were calculated using three methods: solids discharge, volume difference, and hydrosedimentological modeling. In the first, sedimentation rates were obtained by comparing the difference in sediment transport between sections. In the second, they were calculated for different mineral extraction areas based on the difference in sediment volumes. Finally, a computational sediment modeling was conducted for the section between Vale Verde and Amarópolis for the period from 2012 to 2019, which indicated a predominance of sedimentation in the region. The first methods were qualitatively compared with the model. It was concluded that the sediment measurement difference method is the most suitable, simple and effective tool for the proposed objective.

Keywords: Sediment transport; hydrosedimentological modeling; erosion; environmental management.

1. Introdução

O rio Jacuí, localizado no estado brasileiro do Rio Grande do Sul, possui diversas áreas licenciadas para a extração de areia em seu leito submerso. Para que se possa realizar o licenciamento ambiental dessas áreas, os empreendedores devem submeter estudos de viabilidade ambiental à Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luís Roessler (FEPAM-RS). Dentre outras informações, estes estudos contêm dados de aporte sedimentar, seguindo a metodologia de Carvalho (1994), bem como da variação do volume de areia existente nas áreas de interesse para exploração, obtidos por meio de levantamentos batimétricos, a fim de que se possa verificar as taxas de sedimentação das referidas áreas.

Taxa de sedimentação é um termo utilizado por Carvalho (1994) para fazer referência aos processos físicos que envolvem o comportamento hidrodinâmico dos sedimentos e abrange taxa de erosão, taxa de transporte, assim como a taxa de deposição. Neste trabalho, referiu-se como taxa de sedimentação a quantidade em toneladas, ou o volume em metros cúbicos, de sedimentos por unidade de tempo que entra ou sai de uma determinada área/região do rio, restringindo-se apenas aos processos de erosão e deposição. Se a tendência é a entrada de sedimentos nessa área, a taxa de sedimentação será positiva e representará a sedimentação efetiva do local. Caso contrário, a taxa será negativa e representará erosão.

Sendo assim, considerando que as áreas de menor aporte sedimentar e maior erosão constituem, sob o ponto de vista hidrossedimentológico, áreas de maior fragilidade ambiental ao longo dos cursos fluviais, visto que o aporte se torna insuficiente para compensar a erosão, os estudos relacionados ao transporte de sedimentos ganham importância ao fornecerem dados essenciais para o gerenciamento das atividades desenvolvidas nessas áreas. A identificação dos trechos com predomínio de erosão é fundamental, uma vez que os processos erosivos podem desencadear mudanças no canal fluvial e atuar na destruição da planície de inundação, além de proporcionar problemas de ordem social e econômica (Andrade & Maia, 2018).

No estado do Rio Grande do Sul, segundo Andrade Neto *et al.* (2012), o Jacuí é o rio mais importante no deflúvio do lago Guaíba, apresentando elevada média de descarga líquida, com picos de mais de 4000 m³/s, ao se comparar com os rios Caí e Sinos, que também deságuam no Guaíba, e apresentam picos de vazão não superiores a 1000 m³/s. Adicionalmente, Barros *et al.* (2014) apresentam estudos que procuram entender a influência da descarga líquida dos principais rios tributários da Lagoa dos Patos em sua hidrodinâmica, e também destacam o Jacuí como o principal contribuinte.

Porém, há poucos estudos dedicados ao transporte de sedimentos e às taxas de sedimentação no próprio rio Jacuí (Profill, 2020). Os poucos dados existentes constam dos relatórios técnicos fornecidos à FEPAM no decorrer dos processos de licenciamento ambiental, dificultando assim a análise integrada dos dados e, conseqüentemente, o entendimento mais acurado do comportamento hidrossedimentológico do Jacuí para a identificação das áreas de maior fragilidade ambiental e conseqüente avaliação dos impactos advindos da mineração. Portanto, este estudo possui o objetivo compilar os dados relacionados ao transporte de sedimentos, fornecidos nos processos de licenciamento ambiental, e comparar três metodologias de análise dos mesmos, a fim de verificar qual melhor se aplica enquanto ferramenta ao gerenciamento ambiental dos trechos dos cursos fluviais em que há extração mineral. As metodologias consistem na diferença da descarga de sólidos entre seções transversais, na diferença de cubagens de períodos distintos em uma mesma área, e na modelagem do transporte de sedimentos do rio.

Assim, esse trabalho tem como principal contribuição inovadora o esforço de compilação de dados de relatórios ambientais de um período de 8 anos, o qual possibilitou a comparação de dados de um mesmo trecho, e de um mesmo período, por meio de três métodos distintos. Essa comparação permitiu finalmente a indicação de qual método tem maior acurácia e oferece assim maior eficiência de análise nas áreas requeridas para extração mineral, desde as etapas de planejamento e análise de viabilidade ambiental da atividade de extração, até as etapas de monitoramento dos impactos ambientais advindos e eventualmente da recuperação de áreas degradadas pela atividade.

2. Área de Estudo

2.1 Bacia Hidrográfica do Baixo Jacuí

O objeto de análise deste estudo compreende o leito do rio Jacuí no trecho situado na Bacia Hidrográfica do Baixo Jacuí (BHBJ) (Figura 1C). A bacia está inserida na porção centro-leste do Rio Grande do Sul, abrange 40 municípios e ocupa mais de 17.000 km² (DRHS, 2020a), com uma população estimada de aproximadamente 370.000 habitantes (DRHS, 2020b).

A BHBJ é uma região composta por uma planície de inundação extensa, cuja topografia é predominantemente plana, com presença de várzeas e áreas aluviais, sujeitas a alagamentos durante períodos chuvosos. Além disso, a vegetação é composta por campos e matas ciliares ao longo dos rios, com presença de banhados e lagoas.

O rio Jacuí possui uma extensão total de 710 km, desde sua nascente na Serra Geral até a foz no estuário do Guaíba, próximo à cidade de Porto Alegre, e é o principal curso d'água atravessando a bacia e recebendo afluentes importantes, como os rios Vacacaí e Taquari. O Jacuí desempenha um papel crucial na drenagem da bacia hidrográfica. Sua largura varia ao longo de seu percurso, podendo atingir até 400 m em alguns trechos, e sua vazão média é da ordem de 1.900 m³/s, o que o torna um dos rios mais caudalosos do estado (Kaehler, 2011). Além disso, quanto à sua morfologia, o Jacuí é considerado anastomosado em setores à jusante de Amarópolis (Zancan Filho & de Quadros, 2017), os quais estão inclusos na região de pesquisa do presente artigo.

O clima na BHBJ é subtropical úmido, influenciado principalmente pela massa de ar tropical atlântica e pela massa de ar polar. Os verões são quentes e úmidos, com temperaturas médias em torno de 24°C, enquanto os invernos são frios, com médias próximas a 15°C. A precipitação ao longo do ano ocorre de forma frequente e bem distribuída, resultando em uma média anual de 1.600 mm, em que os meses de julho, outubro e setembro representam o período mais chuvoso e os meses de março, dezembro e agosto, os de maior seca (Klippel, 2016). Além disso, as flutuações climáticas são uma característica importante da região, podendo ocorrer eventos climáticos com chuvas intensas e prolongadas, que acarretam em enchentes e inundações, e períodos de estiagem, nos quais a disponibilidade de água tende a diminuir.

2.2 Localização da área de estudo

A área de estudo está situada entre os municípios de Vale Verde e São Jerônimo, na BHBJ. O trecho de estudo (Figura 1C) está localizado entre os pontos M1, extremidade montante, e J7 e J8, extremidade jusante, entre as quais há 40 km de extensão de leito principal do rio. A largura média do canal principal é de 250 m, enquanto na ramificação ao

sul, conhecida como rio Velho, é de 120 m, localizada entre as seções S8 e S15 (Figura 1D).

No segmento estudado existem cerca de 40 áreas de extração mineral registradas junto à Agência Nacional de Mineração (ANM), sendo que 22 delas possuem concessão de lavra, as quais equivalem à uma extensão de 35 km do leito do rio Jacuí. Foram obtidos dados de 19 dessas áreas, estando dezessete delas destacadas em azul e duas em vermelho (Figura 1C). As marcações em vermelho foram desconsideradas das análises por apresentarem dados de cubagem inconsistentes que poderiam gerar distorções nos resultados. As extensões aproximadas da maior e da menor área de extração mineral são respectivamente 5.700 e 460 m, com uma média de 1.550 m. Ao longo de todo este trecho foram compilados os dados obtidos pelas empresas mineradoras constantes dos relatórios ambientais fornecidos à FEPAM.

Já a área modelada no software Delft3D (Figura 1D) corresponde aos primeiros 29 km do trecho total e foi escolhida pela maior disponibilidade de dados, maior concentração de áreas de extração mineral e extensão compatível com a capacidade de processamento do computador utilizado.

As seções M1 a M3, à montante da barragem de Amarópolis, e J1 a J8, à jusante da barragem de Amarópolis (Figura 1C), correspondem às seções nas quais foram realizadas as coletas de dados pelas empresas mineradoras, enquanto as seções S1 a S16 (Figura 1D) foram estabelecidas virtualmente para apresentarem os resultados de transporte de sedimento da modelagem. As seções de entrada e saída foram utilizadas para aplicação das condições de contorno do modelo. As seções virtuais S1, S12 e S16 estão posicionadas de forma a coincidir com as seções de campo M1, M2 e M3 e todas as outras seções virtuais foram posicionadas nas extremidades de áreas de extração mineral. Os trechos entre seções, referidos nos itens seguintes deste artigo, foram identificados com nomenclatura específica, a qual consta na Tabela 1.

3. Materiais

Para o desenvolvimento das análises por meio dos três métodos propostos neste estudo, foram utilizados dados primários disponíveis nos diagnósticos ambientais e relatórios de monitoramento constantes da documentação dos processos administrativos públicos de licenciamento ambiental de extração de areia. Os dados foram compilados dos relatórios apresentados pela Sociedade de Mineradores de Areia do Rio Jacuí Ltda (SMARJA), empresa que realiza extração mineral no trecho em estudo.

Os principais dados reunidos foram: descargas de sedimentos em suspensão (Rosa, 2018a, 2018b; 2019a, 2019b), descargas de sedimentos por arraste no leito (Rosa, 2018a, 2018b; 2019a, 2019b), estimadas pelos ábacos de Colby (1957) e cubagens realizadas por meio de comparação entre superfícies batimétricas (Leites, 2016; Pretto, 2017a, 2017b, 2017c, 2017d; Zanette, 2017a - 2017l). Associados às descargas de sedimentos, foram compilados os dados de vazão, concentração de sólidos em suspensão, velocidade média da vazão e largura do canal (Rosa, 2018a, 2018b; 2019a, 2019b).

Além disso, dados adicionais foram obtidos por outras fontes: volumes de extração mineral foram solicitados diretamente para a SMARJA; extensões longitudinais das áreas foram estimadas a partir de imagens de satélite do Google Earth Pro (2001); e conjuntos mais robustos de dados de vazão, nível d'água e velocidade dos ventos foram obtidos por intermédio do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH, 2018).

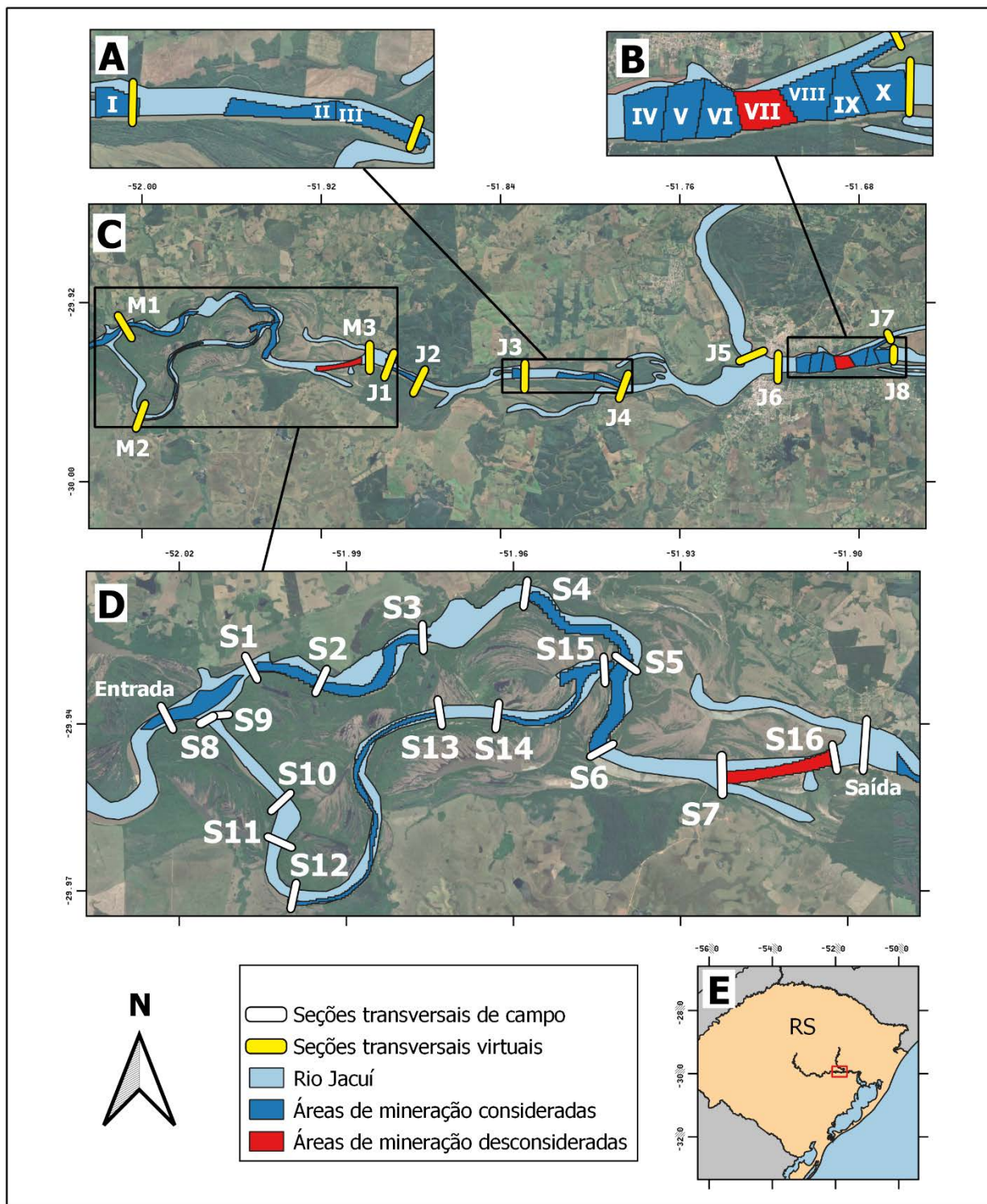


Figura 1. Localização dos trechos de estudo. Imagens de satélite: Google Earth (2001). A) Áreas de extração (I a III) entre as seções J3 e J4; B) Áreas de extração (IV a X) entre as seções J6 e J8; C) Seções transversais das amostragens de campo (M1 a M3 e J1 a J8) e áreas de extração mineral; D) Trecho modelado, seções transversais de controle (S1 a S16) e contorno (Entrada e Saída); E) Mapa de localização no Estado do Rio Grande do Sul.

Figure 1. Location of study stretches. Satellite images: Google Earth (2001). A) Extraction areas (I to III) between sections J3 and J4; B) Extraction areas (IV to X) between sections J6 and J8; C) Cross-sections of field sampling (M1 to M3 and J1 to J8) and mineral extraction areas; D) Modeled stretch, control cross sections (S1 to S16) and boundary cross sections (Input and Output); E) Location map in the State of Rio Grande do Sul.

Tabela 1. Nomenclatura dos trechos entre seções transversais apresentadas na Figura 1.

Table 1. Nomenclature of the sections between cross sections shown in Figure 1.

Trecho	Seção(ões) de entrada	Seção(ões) de saída
1	M1 & M2	M3
2	M3	J1
3	J1	J2
4	J2	J3
5	J3	J4
6	J4 & J5	J6
7	J6	J7 & J8
A	S1	S2
B	S2	S3
C	S3	S4
D	S4	S5
E	S5 & S15	S6
F	S6	S7
G	S7	S16
H	S8 & S9	S10
I	S10	S11
J	S11	S12
K	S12	S13
L	S13	S14
M	S14	S15
N	S1 & S12	S16

4. Métodos

4.1 Estudos hidrossedimentológicos

A pesquisa hidrossedimentológica é uma área multidisciplinar que investiga a dinâmica dos sedimentos em corpos hídricos. No Brasil, essa temática tem sido objeto de estudo de diversos pesquisadores, contribuindo para o entendimento dos processos fluviais e da dinâmica dos sedimentos, para o desenvolvimento de estratégias de manejo e conservação dos recursos hídricos e avaliação dos impactos ambientais.

Neste contexto, Macedo *et al.* (2019) abordaram uma primeira tentativa para a compreensão da dinâmica hidrossedimentológica do rio Paraguai, na região de Corumbá. Para tanto, o estudo foi baseado em um conjunto de análises de campo, dados hidrológicos da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) e equações matemáticas para calcular parâmetros hidráulicos. A análise de campo contou com levantamentos batimétricos para a modelagem do leito; medição do perfil de velocidades através de um perfilador acústico de correntes por efeito Doppler; e coleta de sedimentos em suspensão com amostrador contínuo vertical, analisados por espectrômetro. Os principais parâmetros hidráulicos calculados foram o número de Reynolds, o número de Froude, a potência de

fluxo e a declividade da superfície d'água. Os resultados indicaram uma relação complexa entre o canal do rio e sua planície de inundação, causada pelos mecanismos de cheia. Além disso, os autores enfatizam a necessidade da melhora e da expansão dos dados disponíveis para este tipo de estudo.

Leli *et al.* (2020) investigam a origem e evolução das ilhas fluviais em grandes rios anastomosados, utilizando o rio Paraná como estudo de caso. Os resultados indicaram um avanço no entendimento da dinâmica de formação de ilhas que podem ser classificadas em duas categorias principais: ilhas de barra de canal formadas por processos dentro canal e ilhas recortadas da planície de inundação formadas por avulsão fora do canal. Além de demonstrarem que a vegetação desempenha um papel importante na formação das ilhas, mas não protege contra a erosão depois que ela é formada.

Ainda neste tema, Stevaux *et al.* (2021) procuram entender, a partir da hidrossedimentologia, o motivo de grandes rios tenderem à formação de canais anastomosados (com canalização múltipla). Assim, os autores confirmam, através de levantamentos hidráulicos e batimétricos, a teoria, antes demonstrada apenas matematicamente, de que a multicanalização é um mecanismo pelo qual o rio mantém a sua eficiência máxima. Outra conclusão importante observada foi o fato de o fluxo manter sua eficiência através do aumento da declividade e/ou da redução da razão largura/profundidade.

4.2 Aplicação de modelos computacionais

A modelagem computacional compreende uma das principais ferramentas para o desenvolvimento de estudos hidrossedimentológicos, oferecendo inúmeras possibilidades de aplicação em diferentes ambientes, com objetivos variados. Essa abordagem permite simular e compreender processos hidráulicos e sedimentares complexos, valiosos para a gestão de recursos hídricos e avaliação de impactos ambientais. Através das modelagens é possível obter uma visão detalhada dos fenômenos hidrossedimentológicos, contribuindo para a tomada de decisões e para a busca por soluções sustentáveis.

Rocha *et al.* (2008) apresentam uma simulação para o rio Magdalena na Colômbia a partir do software HEC-RAS, utilizando dados de entrada correspondentes a batimetrias, descargas líquidas e informações hidrométricas. O estudo demonstrou que a metodologia é aplicável a rios de grande caudal, com fluxos difluentes, permanente e não permanente, com confluências e derivações.

Amaral & Alfredini (2010) também utilizaram modelagem hidrossedimentológica para avaliar o transporte de sedimentos no canal de acesso do Complexo Portuário do Maranhão. O estudo simulou a distribuição de sedimentos em diferentes condições de maré e ondas, com o objetivo de identificar áreas críticas de deposição de sedimentos e avaliar o impacto da dragagem no canal de acesso. O programa utilizado para a simulação foi o MIKE 21 e a teoria aplicada para o transporte de fundo foi a descrita pelas equações de Meyer-Peter e Müller.

Azenha & Gobbi (2014), simularam as mudanças nas velocidades e no padrão de erosão/sedimentação do rio Paraguai decorrentes da construção da Ponte Eurico Gaspar Dutra a partir de um modelo no Delft3D. Os autores avaliaram dois cenários, incluindo a presença e a ausência da ponte. Para tanto foram utilizados dados de batimetria, vazão, amostras de sedimentos, declividade e velocidade. Os resultados apontaram profundidades de 10 metros a mais, em média, nas regiões à jusante dos pilares. Também foi verificado através do Delft3D que, em caso de uma possível retirada dos pilares, o rio tende a corrigir

as grandes desigualdades na profundidade por meio de processos erosivos e de sedimentação.

Fagundes *et al.* (2018) apresentam uma comparação entre simulações realizadas a partir de um modelo simples (MGB-SED), e um modelo mais complexo no HEC-RAS para um trecho do rio Doce entre as cidades de Governador Valadares e Resplendor (Minas Gerais). Os resultados demonstraram que ambos os modelos foram capazes de reproduzir de forma satisfatória o comportamento do transporte de sedimentos, mas o modelo MGB-SED, apresentou vantagem no tempo computacional, sendo 75 vezes mais rápido que o HEC-RAS para a região estudada.

Campana (2022) fez o uso do programa HEC-RAS para modelar o comportamento dos sedimentos no rio Doce na cidade de Colatina (Espírito Santo). Para o modelo, foram levantados dados de batimetria, seção do rio, vazões líquidas e sólidas, temperatura e granulometria. A autora realizou testes com três equações diferentes para o transporte de sedimentos, sendo elas as de: Engelund & Hansen; Ackers & White; e Yang. De acordo com as características do rio, as equações propostas por Yang parecem ser ideais, porém, a equações que apresentaram resultados mais coerentes com os dados de campo, em relação às condições de elevação do leito, foram as de Engelund & Hansen.

Em relação aos softwares de modelagem, a capacidade de modelos numéricos para reproduzir alternativas morfodinâmicas de cursos hídricos são conhecidas em alguns pacotes de softwares: Delft3D (Lesser *et al.*, 2004), TELEMAC (Mendoza *et al.*, 2017) e iRIC (Nelson *et al.*, 2016). Dentre eles, destaca-se o Delft3D como um software de código aberto criado para produzir, combinar e compartilhar conhecimento na área de modelagem de cursos d'água. Esta ferramenta foi desenvolvida pelo instituto independente Deltares na cidade Delft na Holanda que possui o foco em pesquisa aplicada no campo hídrico e de subsuperfície. O Delft possui módulos de fluxo, morfologia, ondas, partículas e qualidade d'água. Sendo assim, este foi o software escolhido para a aplicação do método proposto neste estudo.

4.3 Modelagem hidrossedimentológica

Para este método foram utilizadas imagens de satélite obtidas a partir do Google Earth (2001); séries diárias de vazões e níveis d'água provenientes da estação fluviométrica de Rio Pardo (85900000), operada pela ANA (SNIRH, 2018); e curvas-chave de descarga x vazão elaboradas a partir de 22 pontos amostrados entre os anos de 2018 e 2019 nas seções M1 a M3 e J1 a J8 constantes nos processos de licenciamento ambiental da FEPAM (Rosa, 2018a, 2018b; 2019a, 2019b).

A modelagem foi realizada no software Delft3D (Deltares, 2021) na versão 4.04.01 para um trecho de 29 km iniciando próximo ao Balneário Monte Alegre (seção de entrada), em Vale Verde, até a barragem de Amarópolis (seção de saída), em Santo Amaro do Sul (Figura 1D), simulada para o período de 1º de janeiro de 2012 a 31 de outubro de 2019, correspondente à disponibilidade dos dados de entrada.

Para melhor entender o procedimento metodológico adotado, a Figura 2 apresenta um fluxograma das etapas do processo de modelagem do rio.

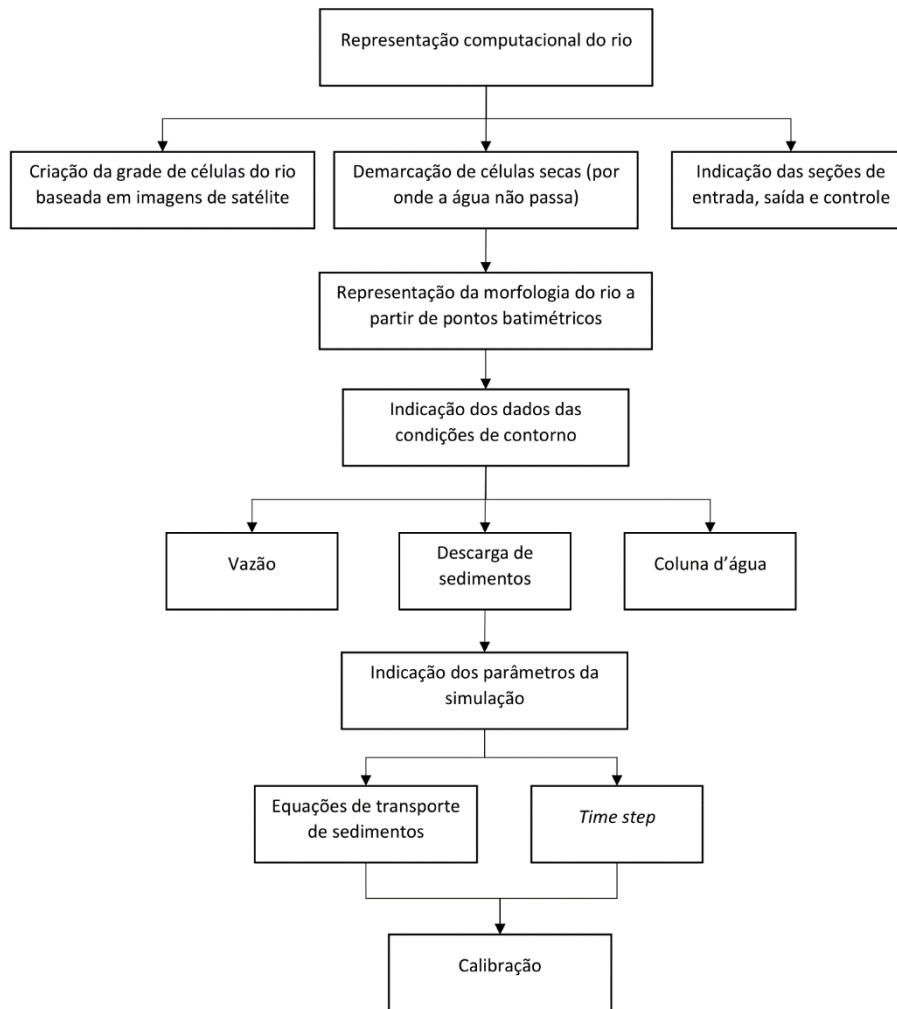


Figura 2. Fluxograma metodológico da modelagem.

Figure 2. Methodological flowchart of the modeling.

A primeira etapa do método consiste na representação computacional da forma do rio, sendo esta gerada a partir de um grid de células quadradas de 50 m de largura. Além disso, as regiões sem fluxo hídrico (células secas) são demarcadas nesta etapa com base em imagens de satélite (Google Earth, 2001). Na sequência também são identificadas as seções de entrada, saída e controle (S1 a S16), conforme apresentadas na Figura 1D.

A seguir, para a determinação da morfologia do rio foi utilizada uma malha tridimensional de pontos batimétricos dos anos de 2014 e 2018. Para regiões sem dados de batimetria, a morfologia foi estimada através de interpolação triangular. Neste ponto, considerou-se a quantidade inicial de sedimentos não coesivos no leito do rio de 7 m uniformes em todo o canal, condizente com as seções batimétricas.

O próximo passo consistiu na determinação das condições de contorno, as quais foram aplicadas às seções de entrada e saída do modelo (Figura 1E). Para a seção de entrada, foram utilizados conjuntos de dados de vazão, descarga de sedimentos por arraste (areia) e por suspensão (argila). Para a seção de saída, foram utilizados dados de coluna d'água.

Os valores diários de descarga de sedimentos foram estimados a partir da aplicação do histórico de vazões nas curvas-chave de descarga \times vazão, tanto para sedimentos

coesivos, quanto para sedimentos não coesivos. Quanto aos valores de coluna d'água, considerou-se a hipótese de que a variação do nível d'água na seção de saída é a mesma observada na estação de Rio Pardo, 70 km à montante.

Por fim, a etapa final consistiu na determinação de parâmetros essenciais para a simulação, tais como o time step (passo de tempo entre a aplicação das fórmulas), as equações regentes do transporte de sedimentos e características dos sedimentos. Vale destacar que o time step relaciona-se com a dimensão das células do grid e, portanto, adotou-se um valor de 0,6 minuto de forma a garantir a estabilidade matemática do modelo. Ademais, para os sedimentos considerou-se a densidade específica de 2650 kg/m³, massa específica seca de 1.600 kg/m³ e D50 de 250 µm (diâmetro mediano da partícula).

As formulações de transporte de sedimentos utilizadas para a simulação foram de Wilcock & Crowe (2003), para a areia em arraste, assim como de Partheniades (1965) para argila em suspensão. Wilcock & Crowe (2003) definiram um modelo para o transporte do material do leito para cursos d'água com presença de areia e cascalho. O mesmo foi desenvolvido considerando um novo conjunto de dados com 48 observações conjuntas de fluxo, transporte de sedimentos e granulometria. As taxas de transporte são referentes à distribuição de tamanho da superfície do leito, no lugar da subsuperfície, permitindo a previsão de condições transitórias. Partheniades (1965) desenvolveu uma equação com pesquisas pioneiras em canais para o aprofundamento do estudo da mecânica de agregação e desagregação. Seus resultados foram obtidos na baía de São Francisco/EUA e se baseiam principalmente na tensão de cisalhamento.

4.4 Método da descarga de sólidos

O uso de medições de descarga de sólidos totais em estudos hídricos está normalmente associado à obtenção da carga de sedimentos em suspensão, pois esta corresponde a maior parte dos sedimentos transportados. Com isso, podem ser citados estudos como de Aquino (2005) que obtém os dados de descarga sólida da ANA para caracterizar a carga de sedimentos em suspensão produzida pela bacia do rio Itapicuru, na Bahia. Também, Leli (2011) avalia a carga sedimentar suspensa no rio Ivaí, no Paraná, e constata que nem sempre existe uma boa correlação entre a descarga hídrica e a descarga de sedimentos, evidenciando o efeito de histerese.

Para fins de comparação das taxas de sedimentação calculadas e verificação da acurácia dos métodos passíveis de aplicação aos estudos hidrossedimentológicos realizados no monitoramento e gestão ambiental das áreas de extração, foram utilizados os dados de descarga de sólidos no cálculo de taxas de sedimentação entre diferentes seções ao longo do trecho de estudo. As taxas foram calculadas para cada uma das 11 seções (Figura 1C) estabelecidas e monitoradas pela empresa SMARJA, a partir dos dados apresentados nos processos de licenciamento ambiental (Rosa, 2018a, 2018b; 2019a, 2019b). Os valores das descargas foram calculados pelos autores dos relatórios ambientais a partir do método de Colby (1957).

A aplicação do método da descarga de sólidos é bastante simples e consiste em calcular a taxa de sedimentação de um determinado trecho, situado entre duas seções transversais, através da subtração dos valores de descarga de sólidos medidos na seção de entrada e de saída.

4.5 Método da diferença de cubagens

Com o mesmo intuito de verificar a acurácia de diferentes métodos de cálculo de taxas de sedimentação passíveis de aplicação aos estudos hidrossedimentológicos, utilizou-se também os volumes de cubagem das áreas de extração, informados nos processos de licenciamento ambiental, para cálculo das taxas de sedimentação.

Neste método, os volumes de cubagem utilizados fazem parte dos dados disponíveis nos processos de licenciamento ambiental (Leites, 2016; Pretto, 2017a, 2017b, 2017c, 2017d; Zanette, 2017a - 2017k) e foram estimados a partir de superfícies topobatimétricas, obtidas por ecobatímetros, e superfícies de leito consolidado (bedrock), determinadas por sondagens rotativas. Além disso, a extração de sedimentos do rio em áreas com mineração ativa (dado denominado de “produção”) foi obtida nos relatórios anuais de lavra – RAL, fornecidos diretamente pela empresa mineradora (SMARJA).

Levantamentos batimétricos para a cubagem de corpos hídricos já são difundidos em pesquisas científicas para a avaliação do transporte de sedimentos. Este é um método versátil que possui uma ampla gama de aplicações nos mais diversos tipos de corpos hídricos, desde de pequenos rios a grandes bacias hidrográficas. Por exemplo, Faria (2014) demonstra o uso de cubagens por batimetria para estimar o transporte de sedimentos em eventos de fluxo torrencial repentino em canais fluviais de primeira ordem, enquanto Fabin (2018) verifica o balanço sedimentar da Baía de Suape, em Pernambuco, pela mesma metodologia.

A metodologia aqui empregada consiste em calcular a taxa de sedimentação em cada área de extração mineral por meio da variação do volume de sedimentos medidos em diferentes períodos. A análise proposta é descrita pela equação 1:

$$TS = \frac{v2 - v1 + p}{n} \quad (1)$$

Onde TS, v1, v2, p e n denotam respectivamente a taxa de sedimentação, volume de cubagem correspondente a uma data mais antiga, volume de cubagem correspondente a uma data mais recente, produção no período entre cubagens e número de meses decorridos.

5. Resultados

5.1 Modelagem hidrossedimentológica

A resultante da representação computacional do leito do rio pode ser observada na Figura 3, onde é possível visualizar o formato dos canais, produzidos pelo grid de células quadradas, e os pontos sem fluxo hídrico, preenchidos com coloração esverdeada.

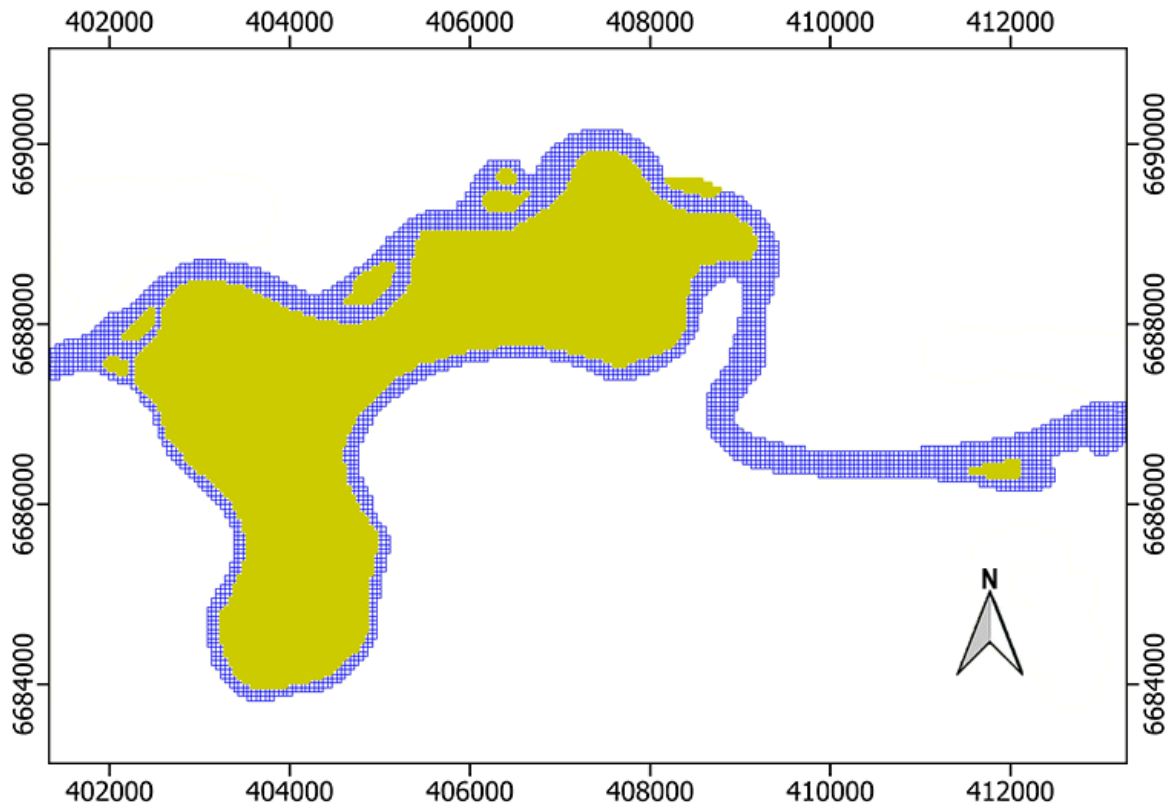


Figura 3. Grid de células quadradas utilizado no modelo e pontos secos destacados em cor esverdeada.

Figure 3. Grid of square cells used in the model and dry dots highlighted in greenish color.

O resultado das curvas-chave de sedimentos, geradas por regressão não linear, estão representadas na Figura 4. Sendo assim, utilizando os valores das séries históricas de vazão aplicados nas equações das curvas-chave, estimou-se a descarga diária de sedimentos para todo o período da simulação, sendo estes utilizados como condição de contorno do modelo.

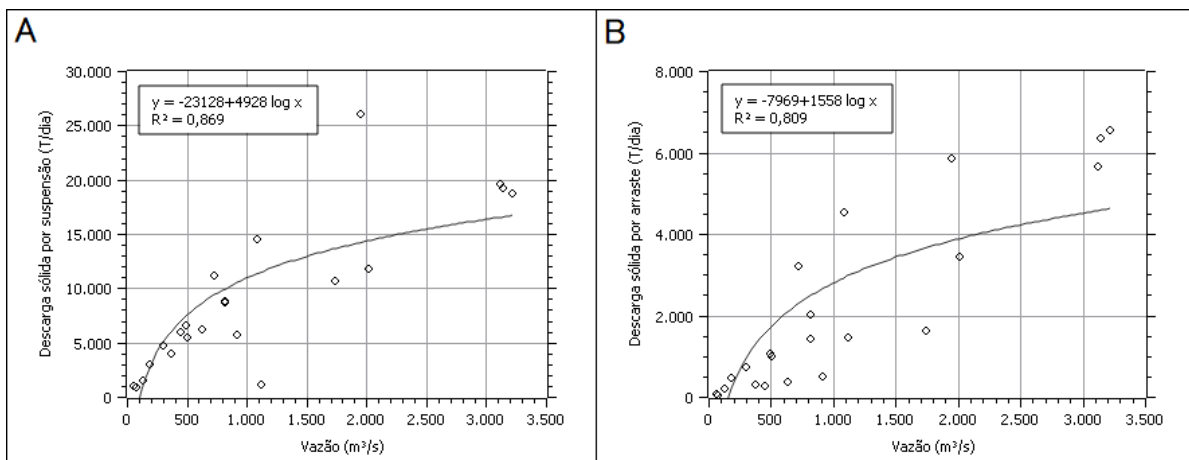


Figura 4. Curvas-chave de sedimentos. A) Sedimentos coesivos; B) Sedimentos não coesivos.

Figure 4. Sediment rating curves. A) Cohesive sediments; B) Non-cohesive sediments.

Assim, para o período de 2012 a 2019, a modelagem indicou um transporte de sedimentos entre -4.629 e 65.740 ton/ano (Tabela 2). Os maiores valores absolutos foram observados nas seções S6, S2 e S5 (65.740, 54.043 e 51.645 ton/ano, respectivamente), enquanto as maiores médias anuais foram observadas nas seções S6, S1 e S2 (37.382, 28.966 e 28.823 ton/ano, respectivamente). Os menores valores foram observados nas seções S15 e S14 (-4.629 e -2.079 ton/ano), com médias de -579 e -97 ton/ano, respectivamente, localizadas na ramificação do rio Velho, logo à montante do encontro com o canal principal. A seção S6 está localizada à jusante do encontro do canal principal com a ramificação do rio Velho e as seções S1 e S2 são as duas primeiras seções de controle do modelo.

As médias nas seções S1, S12 e S16, coincidentes com as seções com medições M1 a M3, são respectivamente 28.966, e 14.612 ton/ano (Tabela 2).

A seção S8 foi a única a não apresentar transporte de sedimentos para o período simulado e constitui, junto com a seção S9, a entrada de sedimentos na ramificação do rio Velho.

Tabela 2. Média anual de transporte de areia por seção da simulação (ton/ano).

Table 2. Average annual sand transport per simulation section (ton/year).

Seção	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	Média
S1	21.492	22.344	30.509	51.194	32.802	34.730	21.209	17.445	28.966
S2	14.641	21.516	30.113	54.043	33.822	35.956	21.585	18.904	28.823
S3	7.682	16.861	10.909	19.917	15.403	15.199	9.760	7.109	12.855
S4	8.135	18.588	12.354	23.683	18.125	18.389	11.044	8.053	14.796
S5	16.142	20.770	27.790	51.645	35.563	36.083	22.987	17.594	28.572
S6	25.923	30.587	38.289	65.740	43.684	44.686	28.151	21.992	37.382
S7	11.201	25.555	18.594	36.380	28.347	29.078	17.663	13.373	22.524
S8	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S9	0	95	0	38	61	6	0	0	25
S10	29	291	215	216	213	240	62	85	169
S11	495	207	46	178	206	84	0	0	152
S12	-4	17	0	4	11	0	0	0	4
S13	0	497	193	456	469	321	5	19	245
S14	-2.079	318	128	329	347	183	0	0	-97
S15	-4.629	0	0	0	0	0	0	0	-579
S16	10.015	21.005	12.650	22.276	17.800	14.898	11.211	7.043	14.612

A partir dos valores de transporte de sedimentos, foram calculadas as taxas de sedimentação para cada trecho entre as seções de controle, bem como para o trecho completo da modelagem (Tabela 3), por meio da subtração do transporte entre as seções de montante e jusante.

Verificou-se que as taxas de sedimentação variaram entre -27.962 e 34.126 ton/ano, sendo ambos os valores observados no ano de 2015, que apresentou cheias históricas,

respectivamente para os trechos D e B (Tabela 3). Observa-se o predomínio da sedimentação ao longo dos trechos A, B, F, G, I, J, L, M e N e de erosão nos trechos C, D, E, H e K. Quanto à variação temporal das taxas de sedimentação e erosão, houve maior sedimentação nos anos de 2015 e 2017 (médias respectivamente de 2.227 e 1.526 ton/ano) e menor nos anos de 2013 e 2018 (médias respectivamente de 110 e 769 ton/ano). Para o período de 8 anos, obteve-se uma taxa de sedimentação média de 14.357 ton/ano ao longo dos 29 km de leito simulado.

Tabela 3. Média anual de transporte de areia por seção da simulação (ton/ano).

Table 3. Annual average sedimentation (ton / year) rate between simulation sections.

Trecho	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	Média
A	6.851	828	397	-2.849	-1.021	-1.226	-375	-1.459	143
B	6.959	4.655	19.204	34.126	18.419	20.757	11.825	11.796	15.968
C	-453	-17.28	-1.445	-3.766	-2.722	-3.190	-1.285	-945	-1.942
D	-8.007	-2.182	-15.436	-27.962	-17.438	-17.694	-11.943	-9.540	-13.775
E	-14.410	-9.817	-10.499	-14.095	-8.121	-8.603	-5.164	-4.398	-9.388
F	14.722	5.032	19.695	29.360	15.337	15.608	10.488	8.619	14.858
G	1.187	4.550	5.944	14.104	10.547	14.180	6.452	6.330	7.912
H	-29	-196	-215	-178	-153	-234	-62	-85	-144
I	-466	84	169	38	7	157	62	85	17
J	498	190	46	175	195	84	0	0	149
K	-4	-480	-193	-452	-458	-321	-5	-19	-242
L	2.079	179	66	127	121	138	5	19	342
M	2.550	318	128	329	347	183	0	0	482
Média (A – M)	883	110	1.374	2.227	1.158	1.526	769	800	-
N (completo)	11.474	1.357	17.859	28.921	15.013	19.832	9.999	10.402	14.357

O resultado qualitativo, com os segmentos de sedimentação e erosão, pode ser observado no mapa da Figura 5, correspondente à sedimentação/erosão acumulada, em metros de areia, até 31/10/2019, último dia de simulação. Os tons de cinza representam áreas com pequena sedimentação (até 5% dos valores máximos); os tons de azul representam a sedimentação e os tons de amarelo e vermelho a erosão.

A partir da Figura 5 verifica-se que as maiores erosões ocorreram junto às margens em trechos curvos do canal principal, que apresenta largura média de 250 m. Por outro lado, as maiores sedimentações ocorreram no meandro abandonado do rio Velho, que apresenta largura inferior, na ordem de 150 m, e velocidades de fluxo menores. Além disso, as zonas de sedimentação/erosão estão em acordo com aquelas identificadas pelo Zoneamento Ambiental da região (Profill, 2020). Porém, vale mencionar que esta figura reflete o resultado acumulado para todo período de análise, não sendo possível verificar a variação sazonal, apesar de ser possível verificar resultados em diferentes períodos a partir da mesma simulação.

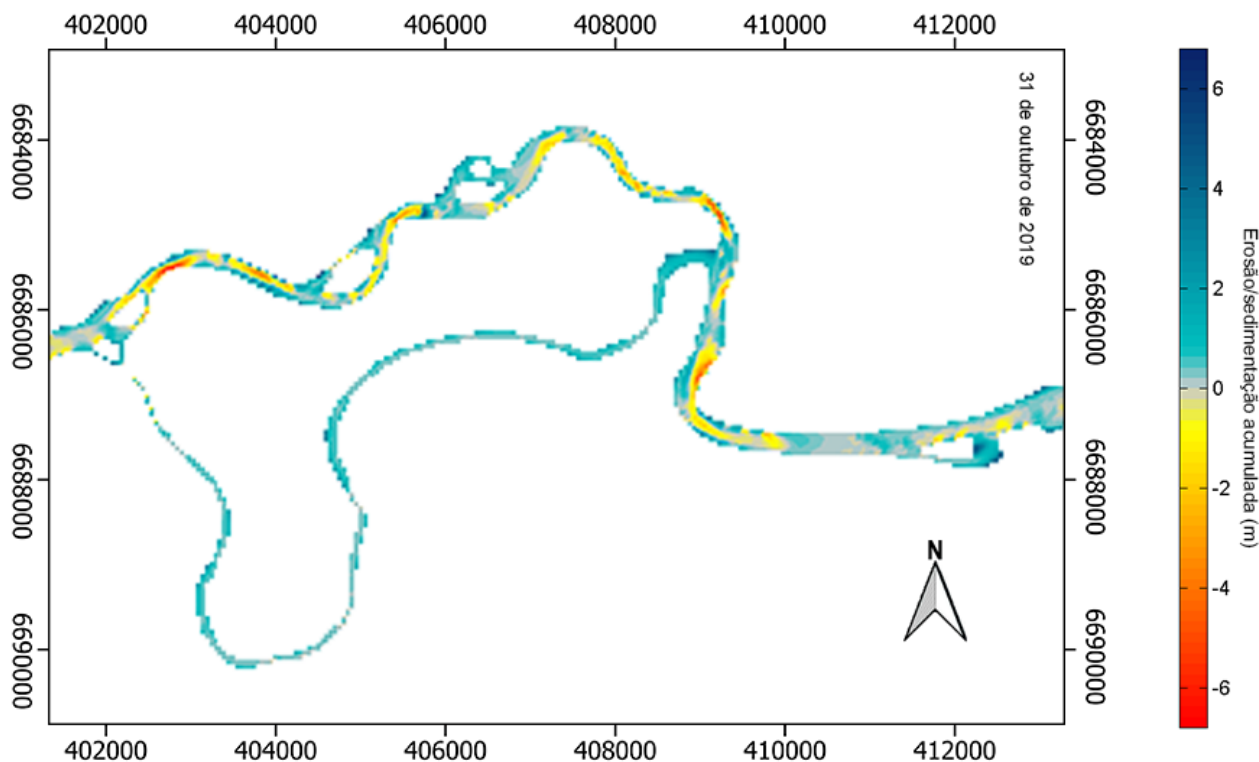


Figura 5. Sedimentação/erosão acumulada até o dia 31 de outubro de 2019.

Figure 5. Accumulated sedimentation/erosion until October 31, 2019.

5.2 Descarga hídrica

A descarga de sólidos de um curso hídrico está diretamente relacionada às descargas hidráulicas ao longo do mesmo. Sendo assim, para melhor interpretarmos as variações das taxas de sedimentação calculadas, se faz necessário considerar as variações de descargas hídricas durante as temporadas de maior e menor pluviosidade ao longo do período de análise no estudo.

O gráfico da Figura 6 apresenta a média mensal das vazões observadas no rio Jacuí, na região à montante da área de estudo, correspondente à disponibilidade de dados, para os anos de 2012 a 2019.

Com base nos dados da Figura 6, o gráfico representado na Figura 7 ilustra a média mensal de vazão calculada para todo o período de 2012 a 2019. Nota-se que março e abril registraram as menores vazões anuais, enquanto julho, setembro, outubro e novembro apresentam as vazões anuais mais elevadas. É importante destacar que as vazões variam consideravelmente. Por exemplo, o mês de outubro, de maior potencial hídrico, apresenta mais que o dobro da vazão do mês de abril, de menor potencial. Além disso, ocorrem grandes variações de um mês para outro, como evidenciado pela redução de 15% no potencial hídrico entre julho e agosto.

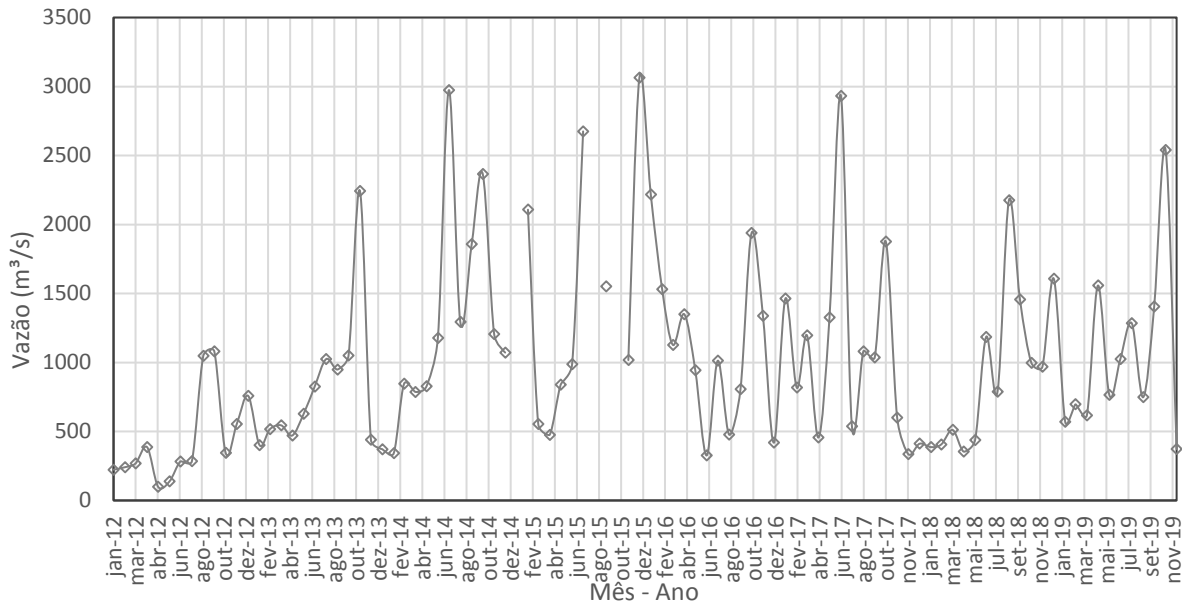


Figura 6. Série histórica de descargas líquidas médias mensais do rio Jacuí em Rio Pardo. Construído a partir dos dados do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH, 2018).

Figure 6. Historical time series of monthly average liquid discharges of the Jacuí River in Rio Pardo. Built using data from the National Information System on Water Resources (SNIRH, 2018).

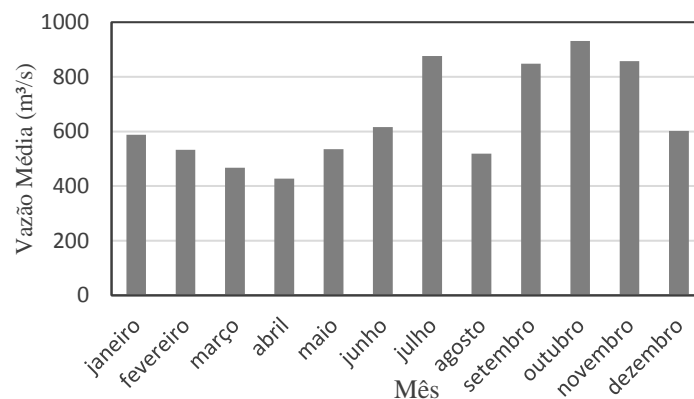


Figura 7. Descarga líquida média mensal do rio Jacuí em Rio Pardo considerando dados de 2012 a 2019. Construído a partir dos dados do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH, 2018).

Figure 7. Average monthly liquid discharge of the Jacuí River in Rio Pardo considering data from 2012 to 2019. Built using data from the National Information System on Water Resources (SNIRH, 2018).

5.3 Descarga de sólidos

Para o presente estudo, a média das taxas de sedimentação de 2018, a partir de dados do mês de agosto, foi de 970 ton/dia (com máxima e mínima respectivamente de 5.982 e -1.141 ton/dia), enquanto a média de 2019, calculada a partir do mês de outubro, foi de 179 ton/dia (com máxima e mínima respectivamente de 2.245 e -3.829 ton/dia), isto é, 2018 apresentou uma taxa média de sedimentação anual 5,41 vezes maior que 2019, conforme a tabela 4, onde cada trecho corresponde à área entre as seções identificadas na Figura 1C.

Tabela 4. Taxa de sedimentação (T.S.) de 2018 e 2019 calculadas pelo método da descarga de sólidos.

Table 4. Sedimentation rate (T.S.) 2018-2019 calculated by the solid discharge method.

Trecho	Seção	Lat.	Lon.	T.S. (ton/dia) 08/18	T.S. (ton/dia) 10/19
1	M1	-29,930455	-52,008057	465,00	2.244,72
	M2	-29,971461	-52,000975		
	M3	-29,946489	-51,897744		
2	M3	-29,946489	-51,897744	-1.140,68	1.050,61
	J1	-29,949401	-51,889641		
3	J1	-29,949401	-51,889641	450,32	-1.639,22
	J2	-29,955483	-51,876238		
4	J2	-29,955483	-51,876238	740,57	-3.829,23
	J3	-29,952716	-51,828952		
5	J3	-29,952716	-51,828952	-795,35	1.324,60
	J4	-29,957592	-51,786656		
6	J4	-29,957592	-51,786656	5.982,13	1.620,38
	J5	-29,944363	-51,729428		
	J6	-29,948862	-51,716162		
7	J6	-29,948862	-51,716162	1.087,34	482,68
	J7	-29,936621	-51,665911		
	J8	-29,943617	-51,664592		
Média das taxas de sedimentação:				969,90	179,22

O mês de agosto corresponde ao terceiro mês de menor vazão, enquanto outubro é o mês que apresenta as maiores vazões anuais. Sendo assim, a grande diferença observada nas taxas de sedimentação pode estar relacionada às diferenças de potencial hídrico de cada mês. O fato de agosto apresentar menores vazões favorece a precipitação de sedimentos em suspensão, enquanto que as maiores vazões de outubro facilitam a remoção de sedimentos da área, provocando menores taxas de sedimentação.

Os resultados da Tabela 4 também se correlacionam com a fisiografia do rio. O trecho 6 foi o que apresentou as maiores taxas de sedimentação, e corresponde à uma região de confluência com o rio Taquari. O trecho 1 também apresenta elevadas taxas de sedimentação, e corresponde a uma área extensa com a presença do meandro abandonado denominado de rio Velho. Em oposição, os trechos com menor acúmulo de sedimentos, ou com taxas negativas, se encontram logo a jusante da barragem de Amarópolis (trechos 3 e 4), onde há a diminuição do fluxo de sedimentos, bem como a ocorrência de um canal retilíneo.

5.4 Diferença de cubagens

Neste estudo, a diferença de cubagens apresentou uma média de reposição para todas as áreas de extração mineral, ao longo do período analisado (agosto de 2014 – agosto de 2016), equivalente a 1,38 m³/mês/m (2.132 m³/mês por área ou 107 ton/dia,

considerando a média de comprimento das áreas de 1.550 m e areia com densidade de 1.500 kg/m³), conforme Tabela 5. Os trechos indicados na tabela podem ser observados nas Figuras 1A, 1B e 1D. A menor e a maior extensão das áreas de extração são de 423 m e 5.775 m. Para este período, a extração comercial média de areia das áreas analisadas foi de 4.541 m³/mês.

Os dados constantes da Tabela 5 também indicam que as áreas de extração dos trechos 7 (IV), K e E apresentam as maiores taxas médias de sedimentação (respectivamente de 7,95, 6,28 e 5,83 m³/mês/m). As áreas de extração do trecho D, 5 (II) e M apresentaram em média taxas positivas, mas com valores muito próximos a zero (respectivamente 0,97, 0,35 e 0,31 m³/mês/m).

Tabela 5. Taxa de sedimentação por metro de comprimento, de 2014 a 2016, pelo método da diferença de cubagens.

Table 5. Sedimentation rate per meter of length, from 2014 to 2016, applying the cubages difference method.

Trecho*	08/14 a 01/15 [Período 1] (m ³ /mês/m)	01/15 a 08/15 [Período 2] (m ³ /mês/m)	08/15 a 01/16 [Período 3] (m ³ /mês/m)	04/16 a 08/16 [Período 4] (m ³ /mês/m)	08/14 a 08/16 [Período 5] (m ³ /mês/m)	Média [Período 1- 4] (m ³ /mês/m)
A	3,707	12,191	-12,984	16,524	2,754	4,860
B	6,13	10,084	3,161	-4,451	4,530	3,731
D	4,493	6,796	-7,647	0,216	0,405	0,965
K	33,192	-10,998	-11,44	14,366	2,288	6,280
M	-0,158	4,474	-0,828	-2,26	0,619	0,307
E	6,360	11,405	-7,488	13,051	4,331	5,832
3	5,928	8,966	-10,089	0,286	0,535	1,273
4 (I)	22,554	9,887	-12,344	-15,524	0,880	1,143
5 (II)	14,54	6,667	-13,351	-6,456	-0,553	0,350
5 (III)	27,103	4,745	-15,740	-4,036	1,111	3,018
7 (IV)	55,397	9,585	4,534	-37,738	9,558	7,945
7 (V)	86,385	-2,292	-7,088	-59,895	4,983	4,278
7 (VI)	69,190	7,830	-27,382	-41,701	0,621	1,984
7 (VIII)	65,230	-7,895	-30,836	-46,966	-6,819	-5,117
7 (IX)	88,387	12,482	-55,568	-14,009	1,197	7,823
7 (X)	53,127	39,033	-73,75	-13,780	-4,427	1,158
Média:	33,848	7,685	-17,428	-12,648	1,376	-

* Os dados dos trechos G e 7 (VII) foram desconsiderados por apresentarem erro na cubagem, observado na compilação dos dados, e, portanto, não participam do cálculo das médias.

Assim como no método anterior, trechos de sedimentação elevada ocorrem no rio Velho e logo após seu reencontro com o Jacuí (trechos K e E), e na região retilínea logo após a inserção do rio Taquari (trecho 7 - IV). Quanto às menores taxas, o comportamento observado no trecho D, está de acordo com as zonas de erosão observadas na modelagem.

O trecho 5 (II) encontra-se em um trecho retilíneo após a barragem de Amarópolis, onde também foram verificadas as menores taxas de sedimentação de acordo com os resultados da descarga de sólidos. A única exceção foram as baixas taxas de sedimentação observadas no trecho K, que se encontra ao final do rio Velho.

De modo geral, o maior valor de taxa de sedimentação por metro de comprimento encontrado com este método foi de 88,39 m³/mês/m para o período de agosto de 2014 a janeiro de 2015 no trecho 7 (IX), sendo justificada pelas cheias históricas, com as maiores vazões apresentadas pelo Jacuí neste ano. O menor valor foi de -73,75 m³/mês/m para o período de agosto de 2015 a abril de 2016 no trecho 7 (X). É importante salientar que o período com dados para a aplicação deste método não corresponde ao período do método da descarga de sólidos, impossibilitando a comparação entre ambas as metodologias.

6. Discussão

6.1 Aplicações das modelagens

Modelagens hidrossedimentológicas, em razão de seu caráter preditivo, possuem aplicação direta na gestão ambiental e hídrica, proporcionando subsídio para o planejamento das ações na gestão dos recursos públicos. As modelagens auxiliam na identificação de áreas suscetíveis à erosão e sedimentação, possibilitando a implementação de medidas de controle e mitigação. Além disso, ajudam na determinação de áreas prioritárias para a conservação e recuperação de ecossistemas aquáticos, bem como na definição de estratégias para o uso sustentável dos recursos hídricos.

O Zoneamento Ambiental para a Atividade de Mineração de Areia nos Cursos Médio e Baixo do Rio Jacuí (Profill, 2020) é um exemplo recente da aplicação dessa metodologia à elaboração de instrumentos de gerenciamento ambiental, uma vez que tem como objetivo a indicação das áreas mais e menos favoráveis à extração mineral e possibilita a elaboração de diretrizes ambientais para o gerenciamento dessas áreas. Esse estudo foi realizado a partir do modelamento do transporte de sedimentos ao longo do rio Jacuí, para o qual foi utilizado o software HEC-RAS e aplicadas as formulações de Meyer-Peter & Müller (1948).

A modelagem realizada no referido zoneamento ambiental compreendeu uma extensão de 261 km do rio, no qual está inserido o trecho entre Balneário Monte Alegre e Santo Amaro do Sul, para o qual foi aplicado o modelo constante deste artigo, cujo projeto de pesquisa data de 2019, iniciado, portanto, antes do zoneamento, aspecto que aponta a percepção da necessidade premente à época de investigação integrada das taxas de sedimentação ao longo do rio Jacuí. Ambos os estudos apresentaram, para esse mesmo trecho, predomínio de sedimentação em aproximadamente 65% da extensão do trecho analisado, sendo as regiões ao redor das seções S1 e S6 as preferenciais para a sedimentação (Figura 5). O fato de ambos modelos apresentarem resultados semelhantes indica a adequação e acurácia do método aplicado às áreas de estudo no rio Jacuí.

A abordagem com o uso de simulações computacionais vem sendo aplicada com sucesso ao estudo de corpos hídricos fluviais e lacustres, bem como a investigações de sistemas costeiros. Silva *et al.* (2017), por meio do Sistema de Modelagem Costeira (SMC-Brasil), avaliaram a dinâmica litorânea da Barra do Itariri/Bahia, onde foram gerados dados de ondas, marés e transporte de sedimentos. O Delft3D, utilizado no presente estudo, também conta com um módulo de ondas que pode ser utilizado para a mesma finalidade.

No entanto, no Rio Grande do Sul, apesar da necessidade de investigação das taxas de sedimentação e da identificação dos trechos com predomínio de sedimentação e erosão para fins de gerenciamento ambiental das áreas de mineração, dentre outras atividades econômicas desenvolvidas ao longo dos rios dos estado, as modelagens dos corpos hídricos ainda são incipientes, devido, majoritariamente, à falta de medições sistemáticas de descarga líquida e sólida necessárias à validação quali e quantitativa dos modelos, bem como ao próprio avanço metodológico. Nesse sentido, destaca-se o trabalho de Scottá *et al.* (2020), no qual foram realizadas medições de descarga líquida e sólida no lago Guaíba, demonstrando que a descarga líquida medida apresenta uma correlação de 0,93 com o somatório dos dados de vazão estimados a partir de séries temporais dos quatro principais tributários do Guaíba (rios Jacuí, Taquarí, Caí e Sinos). Estudos desse tipo são fundamentais para o avanço das modelagens hidrossedimentológicas no Estado.

6.2 Taxas de sedimentação: modelagem vs. diferença de cubagens

A fim de comparação entre as diferentes metodologias propostas, os resultados da modelagem foram avaliados qualitativamente em relação àqueles obtidos para os métodos da descarga de sólidos e da diferença de cubagens. Optou-se pela abordagem qualitativa devido ao conjunto pouco robusto de dados de batimetria e descarga de sólidos, o que prejudica a validação quantitativa do transporte de sedimentos calculado no modelo. Essa mesma abordagem foi utilizada por Duong *et al.* (2018) para validar os resultados morfodinâmicos obtidos através da modelagem costeira no Delft3D para as lagoas Negombo e Kalutara e para o rio Maha Oya, no Sri Lanka. Os autores também justificam a validação qualitativa afirmando que a disponibilidade de dados batimétricos repetidos é uma ocorrência rara no mundo todo.

A validação qualitativa, por meio da comparação entre os resultados obtidos nos diferentes métodos, permite verificar qual melhor identifica as zonas de ocorrência de erosão e sedimentação, fornecendo subsídios para a tomada de decisões relacionadas ao planejamento e monitoramento das áreas mineradas. No contexto qualitativo, os resultados servem principalmente como indicadores das zonas de ocorrência de erosão e sedimentação, representando a espacialização dos fenômenos que ocorrem no corpo hídrico.

A validação dos trechos de predomínio de sedimentação e erosão do modelo por meio do método da diferença de cubagens (Tabela 6) foi realizada por meio das seções de controle estabelecidas no modelo, as quais foram posicionadas de forma a coincidir com as seções de montante e jusante de cada área de mineração (Figura 1D). A diferença de cubagens possui resultados para o período de janeiro a agosto de 2015 e para agosto de 2015 a abril de 2016 (Tabela 6), portanto, fez-se a média destes dois períodos como representante da taxa de sedimentação anual média para o ano de 2015, equivalente ao período em comum com a modelagem.

Dos sete trechos analisados, seis foram considerados validados, uma vez que ambos os métodos estão em concordância em relação à tendência de sedimentação ou erosão no trecho específico. O trecho E foi o único não validado, uma vez que a modelagem aponta erosão, enquanto os resultados obtidos em campo indicam sedimentação para o mesmo período.

Tabela 6. Taxas de sedimentação obtidas pelo método da diferença de cubagens e pela modelagem em ton/ano para 2015.

Table 6. Comparison between sedimentation rates obtained by the cubages difference method and by modeling in ton/year for 2015.

Trecho	Cubagem (ton/ano)	Modelagem (ton/ano)
A	-9.187	-2.849
B	295.110	34.126
D	-18.247	-27.962
K	-1.166.201	-452
M	82.826	329
E	65.066	-14.095
G	785.197	14.104

A partir dos resultados validados, e do fato de cada trecho ser uma área licenciada para extração mineral, é possível identificar regiões críticas onde ocorrem processos erosivos intensos. Assim, as empresas podem ajustar suas operações, evitando locais sensíveis ou adotando práticas de extração mais sustentáveis, de forma a reduzir o impacto ambiental da mineração e promover uma abordagem mais responsável e equilibrada em relação aos recursos hídricos.

Alam & Matin (2012), por intermédio da simulação do rio Karnafuli, em Bangladesh, identificam que as zonas mais suscetíveis à erosão são aquelas junto à parte de cônica de curvas e locais de menor profundidade. O rio Jacuí apresenta morfologia semelhante ao Karnafuli, que também foi estudado em seu baixo curso e apresenta característica meandrante com planícies de inundação adjacentes, além de possuir largura de canal semelhante ao Jacuí e desaguar em um corpo hídrico de maior porte. Porém, para o trecho da simulação com divergência de resultados (trecho E), localizado imediatamente a jusante da confluência do canal principal com o rio Velho, verificou-se erosão junto à margem convexa, indicando que a diferença identificada nos dados de campo ocorre em função da morfologia do leito ou da margem interna da curva, as quais não apresentam precisão suficiente na modelagem. Sendo assim, esse é um trecho interessante para novos estudos com o objetivo de entender qual é o seu real comportamento hidrossedimentológico.

Além disso, a resolução das células do grid do canal do rio Velho é muito baixa, pois este canal apresenta largura significativamente inferior ao leito principal do Jacuí. Sendo assim, o fluxo hídrico está limitado a poucas células, principalmente junto às seções S8 e S9, conforme apresentado na Figura 3. Bomers *et al.* (2019) avaliam a influência do formato e tamanho das células do grid em modelagens hidráulicas de rios. Os autores concluem que grids de baixa resolução não são capazes de representar a área das seções transversais de rios como resultado da baixa precisão das batimetrias. Consequentemente, a vazão e o transporte de sedimentos não são corretamente previstos.

Outro ponto a ser considerado é o fato de os volumes de cubagem disponíveis nos estudos compilados considerarem apenas a área minerável do leito do rio, não englobando o volume de sedimentos nas regiões mais próximas às margens, onde a mineração não é permitida pela legislação estadual. Portanto, este pode ser um dos fatores responsáveis pela dificuldade da validação quantitativa entre as taxas de sedimentação calculadas pelo modelo e pela diferença de cubagens.

Adicionalmente, enfatiza-se que altos valores de taxas de sedimentação, observados nas cubagens de 2015, estão associados ao fato deste ter sido um ano muito chuvoso que apresentou inclusive os maiores níveis históricos do Jacuí, superando o recorde anterior de 1940.

6.3 Taxas de sedimentação: modelagem vs. descarga de sólidos

Quanto à comparação qualitativa dos dados do modelo com os obtidos no método da descarga de sólidos (Tabela 7), foram utilizados os dados medidos nas seções M1, M2 e M3 (trecho 1 das medições, equivalente ao trecho N da simulação), no período de 2018 a 2019, correspondente ao período coincidente entre os dois métodos. Conforme a Tabela 7, tanto o modelo quanto a descarga de sólidos indicam a predominância de aporte de sedimentos neste trecho, estando o modelo validado qualitativamente para o período de 2018 e 2019.

Tabela 7. Comparação entre taxas de sedimentação obtidas pelo método da descarga de sólidos e pela modelagem em ton/ano para 2018 e 2019.

Table 7. Comparison between sedimentation rates obtained by the solid discharge method and by modeling in ton/year for 2018 and 2019.

Trecho	Ano	Método da Descarga (ton/ano)	Modelagem (ton/ano)
1 / N	2018	169.725	10.000
	2019	819.323	10.402

Neste caso, o trecho validado refere-se a uma região que inclui oito áreas de extração mineral com mineração ativa. Os resultados indicam que a tendência geral é o acúmulo de sedimentos, o que favorece a gestão dessas áreas, pois os sedimentos serão naturalmente repostos ao longo do tempo. No entanto, é importante ressaltar que esses resultados indicam a entrada de sedimentos considerando a região como um todo, sem levar em conta a localização específica em que esses sedimentos estão depositados, tornando necessário um controle mais preciso, por meio, por exemplo, de cubagens, para identificar os pontos propícios à extração.

Além disso, a grande diferença observada entre os anos de 2018 e 2019 no método da descarga pode ser justificada pelo mês em que as medições foram realizadas (agosto de 2018 e dezembro de 2019), visto que agosto é um dos meses com a mais baixa descarga hídrica da região, enquanto outubro apresenta o oposto, com as maiores descargas observadas no ano todo (Figura 7). Ademais, a grande diferença numérica entre os resultados do método da descarga e da modelagem é o principal motivo da utilização apenas da validação qualitativa, visto que há uma escassez de dados de descarga de sólidos totais em diferentes épocas no ano.

Em relação ao método empregado, um ponto importante a se observar é que Carvalho (2008) indica que é esperado um erro provável de 10% para a descarga em suspensão, normalmente correspondente a 90% dos sólidos totais, de forma que os resultados quantitativos podem apresentar divergências. Carvalho (2008) também afirma que as chuvas aumentam o transporte de sedimentos nos cursos d'água, sendo necessário um maior número de medições de descarga de sólidos na estação úmida. No período de

estiagem, quando o rio movimentava apenas sedimento da própria calha, em pequena quantidade e com certa regularidade, as medições ou amostragens podem ser feitas ocasionalmente, a cada 15 dias, por exemplo. Mas o ideal é fazer o maior número possível de amostragens seguindo a variação do nível d'água. Cursos d'água pequenos exigiriam medições com frequência horária, enquanto outros mais volumosos, medições diárias ou semanais.

Sendo assim, para a investigação mais precisa e detalhada do transporte de sedimentos ao longo do trecho, é fundamental o aumento da frequência e dos pontos de medição de descarga de sólidos, cujos valores são essenciais para a validação quantitativa da modelagem realizada. Adicionalmente, considerando que a concentração de sólidos em suspensão em corpos d'água também é fortemente afetada pela erosão, a qual é incrementada em períodos de maior pluviosidade (Bertoni & Lombardi Neto, 1990), bem como que o volume e a velocidade da enxurrada dependem da intensidade, duração e frequência da chuva, relacionar a pluviosidade às descargas de sólidos também pode acrescentar um incremento de informação e detalhamento aos modelos de transporte de sedimentos do Estado.

7. Conclusões

Após a comparação das três metodologias de análise do transporte de sedimentos, concluiu-se que o método da diferença de cubagens é a ferramenta mais adequada para o gerenciamento ambiental das áreas de extração mineral ao longo do trecho analisado no rio Jacuí. A principal vantagem desse método reside na sua aplicação individualizada para cada área de extração, possibilitando uma clara identificação se a mesma está passando por um período de reposição ou erosão de seus sedimentos. Com a aplicação contínua desse método, é possível determinar, por exemplo, em quais épocas do ano as taxas de sedimentação são positivas, permitindo uma atividade de mineração que não esgote os recursos naturais nem cause alterações significativas na morfodinâmica do canal. Dessa forma, os órgãos ambientais responsáveis podem impor restrições ou proibições à mineração considerando as variações de transporte ao longo de diferentes trechos do rio, bem como suas alterações sazonais.

Em relação ao método da descarga de sólidos, este revelou-se inadequado para o gerenciamento ambiental devido à escassez de medições de sólidos em suspensão e arraste. Isso resultou na impossibilidade de determinar as variações sazonais do comportamento hidrossedimentológico do rio, o que representa uma grande desvantagem para a metodologia. A sazonalidade exerce uma influência significativa no Jacuí, com períodos de chuvas intensas que causam um alto transporte de sedimentos, e períodos de seca que resultam em um potencial hídrico menos eficiente. Além disso, o método da descarga de sólidos não permite identificar áreas específicas de erosão/sedimentação, sendo capaz apenas de avaliar a tendência geral em uma região mais abrangente. Consequentemente, os resultados são úteis para um controle com escala de detalhe ajustável, mas sozinhos não oferecem informação suficiente para a gestão da atividade de extração mineral. Portanto, há a necessidade do aumento de medições de descarga de sólidos totais, principalmente ao verificar que este também é um dado de entrada de modelos computacionais, que podem ser uma ferramenta preditiva de grande utilidade para o gerenciamento das atividades de extração, de forma complementar ao instrumento de gestão existente no Estado, o Zoneamento Ambiental para a Atividade de Mineração de Areia nos Cursos Médio e Baixo do Rio Jacuí, publicado em 2020.

Já a modelagem hidrossedimentológica demonstrou ser uma ferramenta poderosa para analisar a tendência de sedimentação/erosão tanto em pontos específicos quanto de maneira geral, sendo validada qualitativamente pelos dados de campo de descarga de sedimentos e diferença de cubagens para todos os trechos com exceção do trecho E. No entanto, seus resultados quantitativos não foram validados com dados de campo compilados, limitando seu uso apenas para análises qualitativas. Nesse ponto, os resultados são precisos e coerentes com a fisiografia da região. A principal desvantagem desse método é sua complexidade inicial, exigindo um grande volume de dados de entrada, e a necessidade de uma grande capacidade de processamento computacional para realizar as simulações. Porém, superados os desafios dos dados de entrada e da validação quantitativa, o modelo ganha acurácia e passa a ser uma excelente alternativa para o uso na gestão ambiental.

Sob o ponto de vista qualitativo, os três métodos concordam: no trecho analisado o rio Jacuí possui uma taxa de sedimentação positiva que tem garantido a reposição natural de sedimentos em seu leito, sem indícios erosivos que possam alterar o comportamento hidrossedimentológico predominante. Ou seja, mesmo existindo diversos pontos de erosão ao longo do curso hídrico, a tendência do trecho estudado é de reposição da areia quando todas as áreas são consideradas de forma conjunta.

Além disso, também se concluiu que a necessidade de aumentar a frequência das medições de parâmetros como a descarga líquida, descarga sólida de suspensão e arraste, juntamente com as batimetrias, é fundamental para possibilitar que os métodos auxiliem de forma mais eficiente no manejo das áreas de extração mineral. Enfatiza-se que a escassez de dados foi o principal limitante para obtenção de resultados mais robustos, sendo imprescindível obter dados mais frequentes e abrangentes para uma análise mais detalhada e precisa do comportamento desses parâmetros ao longo do tempo, proporcionando uma compreensão mais sólida dos processos envolvidos na extração mineral.

Por fim, concluiu-se que a frequência de medições deve ser ainda maior para períodos chuvosos, pois, conforme observado nos resultados, a pluviometria possui relação direta com a descarga líquida e, conseqüentemente, com o transporte de sedimentos no canal.

Agradecimentos: Ao CNPq que por meio da bolsa de IC (800022/2018-1) do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica PIBIC/FEPAM proporcionou o desenvolvimento deste trabalho. À Sociedade de Mineradores de Areia do Rio Jacuí (SMARJA) pelo esclarecimento de dúvidas e fornecimento de arquivos para o estudo. Ao Departamento de Recursos Hídricos e Saneamento (DRHS) da Secretaria Estadual de Meio Ambiente e Infraestrutura (SEMAI) na figura do analista Fernando Comerlato Scottá, que colaborou com uma modelagem utilizada como guia para o desenvolvimento deste trabalho. Por fim, agradecemos à Divisão de Mineração (DMIN) da FEPAM pelo apoio na figura da analista Ana Paula de Oliveira Dani.

Contribuições dos Autores: Concepção, I.S.M., R.V.G. e F.M.F.; metodologia, I.S.M., R.V.G. e F.M.F.; software, I.S.M.; validação, I.S.M., R.V.G. e F.M.F.; análise formal, I.S.M., R.V.G. e F.M.F.; pesquisa, I.S.M. e R.V.G.; preparação de dados, I.S.M.; escrita - rascunho original, I.S.M.; escrita - revisão, R.V.G. e F.M.F.; supervisão, R.V.G.; aquisição de financiamento, R.V.G. Todos os autores leram e concordaram com a versão publicada do manuscrito.

Conflito de Interesse: Os autores declaram não haver conflito de interesse.

Referências

Alam, S. & Matin, M.A. 2012. Application of Delft3D Mathematical Model in the river Karnafuli for Two-Dimensional simulation. In: 1ST INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCES IN CIVIL ENGINEERING, 2012, Chittagong. *Anais...* Chittagong, CUET, v. 7.

- Amaral, R.F. & Alfredini, P. 2010. Modelação Hidrossedimentológica no Canal de Acesso do Complexo Portuário do Maranhão. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 15(2): 5-14. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v15n2.p5-14>
- Andrade, J.H.R. & Maia, C.E. 2018. Erosão de Margens em Rios Semiáridos: Estudo na Sub-Bacia do Baixo Jaguaribe – Ceará – Brasil. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 19(4): 859-870. <https://doi.org/10.20502/rbg.v19i4.1379>
- Andrade Neto, J.S., Rigon, L.T., Toldo, E.E. & Schettini, C.A.F. 2012. Descarga sólida em suspensão do sistema fluvial do Guaíba, RS, e sua variabilidade temporal. *Pesquisas em Geociências*, 39(2): 161-171. <https://doi.org/10.22456/1807-9806.35910>
- Aquino, R.F., Carvalho, N.O. & Dominguez, J.M.L. 2005. Carga de Sedimentos em Suspensão Produzida pela Bacia do Rio Itapicuru. In: II CONGRESSO SOBRE PLANEJAMENTO E GESTÃO DAS ZONAS COSTEIRAS DOS PAÍSES DE EXPRESSÃO PORTUGUESA, 2., 2005, Recife. *Anais... Recife*, APRH, p. 1-6.
- Azenha, T.D. & Gobbi, M.F. 2014. Efeitos da ponte Eurico Gaspar Dutra na morfologia do Rio Paraguai. In: XII SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 2014, Natal. *Anais... Natal*, ABRH, p. 1-10.
- Barros, G.P., Marques, W.C. & Kirinus, E.P. 2014. Influence of the Freshwater Discharge on the Hydrodynamics of Patos Lagoon, Brazil. *International Journal of Geosciences*, 5(10): 925-942. <https://doi.org/10.4236/ijg.2014.59080>
- Bertoni, J. & Lombardi Neto, F. 1990. *Conservação do solo*. São Paulo, Ícone Editora, 355p.
- Bomers, A., Schielen, R.M.J. & Hulscher, S.J. 2019. The influence of grid shape and grid size on hydraulic river modelling performance. *Environmental Fluid Mechanics*, 19(5), 1273-1294. <https://doi.org/10.1007/s10652-019-09670-4>
- Campana, K.D.S. 2022. Simulação do transporte de sedimentos em trecho do Rio Doce (ES) utilizando modelagem computacional. *Destarte*, 11(2): 95-130.
- Carvalho, N.O. 2008. *Hidrossedimentologia prática*. 2.ed. Rio de Janeiro, Interciência, 599p.
- Carvalho, N.O. 1994. *Hidrossedimentologia prática*. Rio de Janeiro, CPRM Eletrobras, 372p.
- Colby, B.R. 1957. Relationship of unmeasured sediment discharge to mean velocity. *Transactions American Geophysical Union*, 38(5): 708-717. <https://doi.org/10.1029/TR038i005p00708>
- Deltares. 2021. *Delft3D-FLOW - User Manual: Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments*. Delft, Deltares, 690p.
- DRHS – Departamento de Recursos Hídricos e Saneamento. 2020a. Nota Técnica n. 002/2020/DIPLA/DRHS. Porto Alegre, DRHS/SEMAI, 27p.
- DRHS – Departamento de Recursos Hídricos e Saneamento. 2020b. Nota Técnica n. 003/2020/DIPLA/DRHS. Porto Alegre, DRHS/SEMAI, 21p.
- Duong, T.M., Ranasinghe, R., Thatcher, M., Mahanama, S., Wang, Z.B., Dissanayake, P.K., Hemer, M., Luijendijk, A., Bamunawala, J., Roelvink, D. & Walstra, D. 2018. Assessing climate change impacts on the stability of small tidal inlets: Part 2-Data rich environments. *Marine Geology*, 395, 65-81. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2017.09.007>
- Fabin, C.E.G.S.O. 2018. *Balança sedimentar da Baía de Suape/PE entre os anos de 1994 e 2007: consequências ambientais*. Pernambuco. 146p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Departamento de Geologia, Universidade Federal de Pernambuco.
- Fagundes, H.O., Tschiedel, A.F., Fan, F.M. & Paiva, R.C.D. 2018. Análise comparativa do transporte de sedimentos utilizando os modelos MGB-SED e HEC-RAS. In: XIII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE SEDIMENTOS I PARTÍCULAS DAS AMÉRICAS, 13., 2018, Vitória. *Anais... Vitória*, ABRHidro, v. 13, p. 1-8.
- Faria, A.P. 2014. Transporte de sedimentos em canais fluviais de primeira ordem: respostas geomorfológicas. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 15(2): 191-202. <https://doi.org/10.20502/rbg.v15i2.410>
- Google Earth. *Image*. Versão 7.3. [Califórnia]: Google Earth, 2001.
- Kaehler, T.G. 2011. *Proposta de zoneamento da Bacia Hidrográfica do Rio Jacuí com vistas ao licenciamento de barramentos e conservação de estoques de peixes migradores*. Porto Alegre, 80p. Dissertação de

Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Zoologia, Faculdade de Biociências, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul.

Klippel, A.H. 2016. *Uso da terra e balanço de água em unidades hidrológicas e edafoclimáticas distintas no Rio Grande Do Sul*. Minas Gerais, 51p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa.

Leli, I.T., Stevaux, J.C., Nóbrega, M.T. & Souza Filho, E.E. 2011. Variabilidade temporal no transporte de sedimentos no rio Ivaí - Paraná (1977-2007). *Revista Brasileira de Geociências*, 41(4): 619-628. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.2011414619628>

Leli, I.T., Stevaux, J.C. & Assine, M.L. 2020. Origin, evolution, and sedimentary records of islands in large anabranching tropical rivers: The case of the Upper Paraná River, Brazil. *Geomorphology*, 358: 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107118>

Leites, S.R. 2016. *Resposta ao ofício de 04 de agosto de 2016*. Porto Alegre, SMARJA LTDA, p. 15-35. (Documento constante do processo administrativo de licenciamento ambiental 5700-05.67/11-0).

Lesser, G.R., Roelvink, J.A., Van Kester, J.A.T.M. & Stelling, G.S. 2004. Development and validation of a three-dimensional morphological model. *Coastal Engineering*, 51(8-9): 883-915. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2004.07.014>

Macedo, H.A., Stevaux, J.C., Silva, A., Merino, E.R., Lo, E.L. & Assine, M.L. 2019. Hydrosedimentology of the Paraguay River in the Corumbá fluvial reach, pantanal wetland. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 20(2): 255-271. <https://doi.org/10.20502/rbg.v20i2.1500>

Mendoza, A., Abad, J.D., Langendoen, E.J., Wang, D., Tassi, P. & Abderrezzak, K.E.K. 2017. Effect of sediment transport boundary conditions on the numerical modeling of bed morphodynamics. *Journal of Hydraulic Engineering*, 143(4): 1-12. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001208](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001208)

Meyer-Peter, E. & Muller, R. 1948. *Formulas for Bed Load Transport*. In: INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR HYDRAULIC STRUCTURES RESEARCH, 7., 1948, Delft. P. 39-64.

Nelson, J.M., Shimizu, Y., Abe, T., Asahi, K., Gamou, M., Inoue, T., Iwasaki, T., Kakinuma, T., Kawamura, S., Kimura, I., Kyuka, T., McDonald, R.R., Nabi, M., Nakatsugawa, M., Simoes, F., Takebayashi, H. & Watanabe, Y. 2016. The international river interface cooperative: public domain flow and morphodynamics software for education and applications. *Advances in Water Resources*, 93: 62-74. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2015.09.017>

Partheniades, E. 1965. Erosion and deposition of cohesive soils. *Journal of the Hydraulics Division*, 91(1): 105-139. <https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0001165>

Pretto, G.O. 2017a. *Plano de Lavra*. Porto Alegre, SMARJA LTDA, 07p. (Documento constante do processo administrativo de licenciamento ambiental 4191-05.67/17-10 – FEPAM).

Pretto, G.O. 2017b. *Plano de Lavra*. Porto Alegre, SMARJA LTDA, 07p. (Documento constante do processo administrativo de licenciamento ambiental 4146-05.67/17-6 - FEPAM).

Pretto, G.O. 2017c. *Plano de Lavra*. Porto Alegre, SMARJA LTDA, 12p. (Documento constante do processo administrativo de licenciamento ambiental 4149-05.67/17-4 - FEPAM).

Pretto, G.O. 2017d. *Plano de Lavra*. Porto Alegre, SMARJA LTDA, 16p. (Documento constante do processo administrativo de licenciamento ambiental 4150-05.67/17-1 - FEPAM).

Profill Engenharia e Ambiente. 2020. RT5 - *Hidrografia, hidrossedimentometria e prognósticos*. Porto Alegre, *Profill*, 152p. (Relatório constituinte do Zoneamento Ambiental para a Atividade de Mineração de Areia nos Cursos Médio e Baixo do Rio Jacuí).

Rocha, A.C.S., Peña, C.E.C. & Luna, A.V. 2008. Modelación hidráulica de un sector de río caudaloso con derivaciones empleando HEC-RAS. *Avances en Recursos Hídricos*, (17): 45-54.

Rosa, J.L.S. 2018a. *Relatório Técnico Ambiental*. Porto Alegre, SMARJA LTDA, p. 19-52. (Documento constante do processo administrativo de licenciamento ambiental 5712-05.67/11-7 - FEPAM).

Rosa, J.L.S. 2018b. *Relatório Técnico Ambiental*. Porto Alegre, SMARJA LTDA, p. 21-54. (Documento constante do processo administrativo de licenciamento ambiental 10067-05.67/15-5 - FEPAM).

Rosa, J.L.S. 2019a. *Relatório Técnico Ambiental*. Porto Alegre, SMARJA LTDA, p. 22-78. (Documento constante do processo administrativo de licenciamento ambiental 10068-05.67/15-8 - FEPAM).

- Rosa, J.L.S. 2019b. *Relatório Técnico Ambiental*. Porto Alegre, SMARJA LTDA, p. 20-198. (Documento constante do processo administrativo de licenciamento ambiental 5700-05.67/11-0 - FEPAM).
- Scottá, F.C., Andrade, M.M., Weschenfelder, J., Toldo, E.E. & Nunes, J.C.R. 2020. Descarga líquida e sólida em suspensão no Rio Guaíba, RS, Brasil. *Pesquisas em Geociências*, 47(3): 1-19. <https://doi.org/10.22456/1807-9806.109983>
- Silva, I.R., Guimarães, J.K., Bittencourt, A.C.S.P., Rodrigues, T.K. & Fernandino, G.A.N. 2017. Avaliação da dinâmica litorânea da região de Baixo/Barra do Itariri, litoral norte do Estado da Bahia, utilizando o Sistema de Modelagem Costeira (SMC-Brasil). *Pesquisas em Geociências*, 44(2): 221-234. <https://doi.org/10.22456/1807-9806.78272>
- Stevaux, J.C., Gon, P.P., Leli, I.T. & Fujita, R.H. 2021. Why do large rivers tend to form multichannel? A field study in Upper Paraná River. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 22(4): 967-985. <https://doi.org/10.20502/rbg.v22i4.2014>
- SNIRH. Sistema Nacional de Informações Sobre Recursos Hídricos. 2018. *Portal HidroWeb – Séries Históricas de Estações*.
- Wilcock, P. & Crowe, J. 2003. Surface-based transport model for mixed-size sediment. *Journal of Hydraulic Engineering*. 129(2): 120-128. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2003\)129:2\(120\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2003)129:2(120))
- Zancan Filho, L.C. & Quadros, T.F.P. 2017. Efeito da dinâmica fluvial e da ação antrópica sobre a erosão de margens fluviais: o caso da mineração de areia no Rio Jacuí. *Revista de Ciências Ambientais*, 11(1): 49-64. <https://doi.org/10.18316/rca.v11i1.3179>
- Zanette, I.L. 2017a. *Resposta ao ofício FEPAM/DMIN 1295/2017*. Porto Alegre, SMARJA LTDA, p. 15-65. (Documento constante do processo administrativo de licenciamento ambiental 5687-05.67/11-5 - FEPAM).
- Zanette, I.L. 2017b. *Resposta ao ofício FEPAM/DMIN 1295/2017*. Porto Alegre, SMARJA LTDA, p. 14-54. (Documento constante do processo administrativo de licenciamento ambiental 5688-05.67/11-8 - FEPAM).
- Zanette, I.L. 2017c. *Resposta ao ofício FEPAM/DMIN 1295/2017*. Porto Alegre, SMARJA LTDA, p. 13-44. (Documento constante do processo administrativo de licenciamento ambiental 5689-05.67/11-0 - FEPAM).
- Zanette, I.L. 2017d. *Resposta ao ofício FEPAM/DMIN 1295/2017*. Porto Alegre, SMARJA LTDA, p. 16-65. (Documento constante do processo administrativo de licenciamento ambiental 5695-05.67/11-1 - FEPAM).
- Zanette, I.L. 2017e. *Resposta ao ofício FEPAM/DMIN 1295/2017*. Porto Alegre, SMARJA LTDA, p. 15-63. (Documento constante do processo administrativo de licenciamento ambiental 5712-05.67/11-7 - FEPAM).
- Zanette, I.L. 2017f. *Resposta ao ofício FEPAM/DMIN 1295/2017*. Porto Alegre, SMARJA LTDA, p. 14-48. (Documento constante do processo administrativo de licenciamento ambiental 2886-05.67/15-0 - FEPAM).
- Zanette, I.L. 2017g. *Resposta ao ofício FEPAM/DMIN 1295/2017*. Porto Alegre, SMARJA LTDA, p. 15-54. (Documento constante do processo administrativo de licenciamento ambiental 10065-05.67/15-0 - FEPAM).
- Zanette, I.L. 2017h. *Resposta ao ofício FEPAM/DMIN 1295/2017*. Porto Alegre, SMARJA LTDA, p. 13-51. (Documento constante do processo administrativo de licenciamento ambiental 10066-05.67/15-2 - FEPAM).
- Zanette, I.L. 2017i. *Resposta ao ofício FEPAM/DMIN 1295/2017*. Porto Alegre, SMARJA LTDA, p. 14-47. (Documento constante do processo administrativo de licenciamento ambiental 10067-05.67/15-5 - FEPAM).
- Zanette, I.L. 2017j. *Resposta ao ofício FEPAM/DMIN 1295/2017*. Porto Alegre, SMARJA LTDA, p. 14-47. (Documento constante do processo administrativo de licenciamento ambiental 10068-05.67/15-8 - FEPAM).
- Zanette, I.L. 2017k. *Resposta ao ofício FEPAM/DMIN 1295/2017*. Porto Alegre, SMARJA LTDA, p. 14-47. (Documento constante do processo administrativo de licenciamento ambiental 10069-05.67/15-0 - FEPAM).
- Zanette, I.L. 2017l. *Resposta ao ofício FEPAM/DMIN 1295/2017*. Porto Alegre, SMARJA LTDA, p. 14-51. (Documento constante do processo administrativo de licenciamento ambiental 10107-05.67/15-2 - FEPAM).