

Trabalho de Graduação

Curso de Graduação em Geografia

Monitoramento da turbidez do Rio Paraopeba (MG), após o rompimento da barragem de rejeitos de mina, utilizando um modelo empírico derivado de imagens de satélite Sentinel-2

Pedro Luiz Becaro Crioni

Prof. Dr. Chang Hung Kiang (Orientador)

Dr. Elias Hideo Teramoto (Co-orientador)

Rio Claro (SP)

2021

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Câmpus de Rio Claro

PEDRO LUIZ BECARO CRIONI

MONITORAMENTO DA TURBIDEZ DO RIO PARAÓPEBA
(MG), APÓS O ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE
REJEITOS DE MINA, UTILIZANDO UM MODELO
EMPÍRICO DERIVADO DE IMAGENS DE SATÉLITE
SENTINEL-2

Trabalho de Graduação apresentado ao
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
- Câmpus de Rio Claro, da Universidade
Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho,
para obtenção do grau de Bacharel em
Geografia.

Rio Claro - SP

2021

C931m

Crioni, Pedro Luiz Becaro

MONITORAMENTO DA TURBIDEZ DO RIO PARAPEBA (MG), APÓS O ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE REJEITOS DE MINA, UTILIZANDO UM MODELO EMPÍRICO DERIVADO DE IMAGENS DE SATÉLITE SENTINEL-2 / Pedro Luiz Becaro Crioni. -- Rio Claro, 2021 28 p. : il., mapas

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado e licenciatura - Geografia)

Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Geociências e Ciências Exatas,
Rio Claro

Orientador: Chang Hung Kiang

Coorientador: Elias Hideo Teramoto

1. Sensoriamento remoto. 2. Monitoramento ambiental. 3. SENTINEL-2 (Satélites). 4.
Turbidez em águas fluviais. 5. Modelo Empírico. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Geociências e Rio Claro.

Dados fornecidos pelo autor.

Essa ficha não pode ser modificada.

PEDRO LUIZ BECARO CRIONI

MONITORAMENTO DA TURBIDEZ DO RIO PARAÓPEBA (MG),
APÓS O ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE REJEITOS DE
MINA, UTILIZANDO UM MODELO EMPÍRICO DERIVADO DE
IMAGENS DE SATÉLITE SENTINEL-2

Trabalho de Graduação apresentado ao Instituto de
Geociências e Ciências Exatas - Câmpus de Rio
Claro, da Universidade Estadual Paulista Júlio de
Mesquita Filho, para obtenção do grau de Bacharel
em Geografia.

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Chang Hung Kiang (orientador)

Profa. Dra. Andreia Medinilha Pancher

Me. Bruno Zanon Engelbrecht

Rio Claro, 16 de abril de 2021.


Assinatura do aluno


assinatura do orientador

Agradecimentos

Agradeço especialmente aos meus familiares por todo o apoio durante todas as minhas etapas de vida. Aos colegas de graduação, pelas amizades e pelos momentos compartilhados. Aos companheiros e companheiras do LEBAC. Ao Prof. Dr. Chang por todas as oportunidades que me proporcionou, o que me possibilitou evoluir enquanto profissional e também enquanto pessoa. Ao Dr. Elias que foi fundamental para o processo de aprendizagem da realização deste trabalho.

RESUMO

Em 25 de janeiro de 2019, houve uma falha repentina em uma barragem de resíduos de mineração, localizado no município de Brumadinho, estado de Minas Gerais, sudeste do Brasil. Uma parte significativa dos 12 milhões de m³ de rejeitos de mina foram lançados no Rio Paraopeba após o rompimento da estrutura, produzindo fortes impactos ambientais e sociais, devido principalmente ao aumento significativo na turbidez (ocasionalmente superior a 50.000 NTU – unidade nefelométrica de turbidez). Para estudos desta natureza, as técnicas de sensoriamento remoto podem ser aplicadas de forma eficiente ao monitoramento das variações de turbidez em corpos d'água superficiais. Devido à importância regional do Rio Paraopeba, este trabalho teve como objetivo desenvolver um modelo empírico capaz de produzir estimativas de turbidez com base em imagens de satélite Sentinel-2.

As análises de regressão indicaram que a turbidez se correlaciona bem com a resposta espectral da banda infravermelha próxima (Banda 8) seguindo um modelo exponencial, com valores de R² de 91. A série temporal de turbidez estimada por imagens do Sentinel-2 indica que, durante a estação seca, a turbidez diminuiu para valores pré-rompimento e aumentou durante o período chuvoso. Embora o papel do rejeito descarregado na variação sazonal de turbidez não seja indeterminado, existindo uma significativa alteração dos valores de turbidez Pós e Pré-rompimento da barragem, o modelo proposto no presente trabalho permite o monitoramento das variações de turbidez no Rio Paraopeba relacionadas à ressuspensão sazonal ou deposição de rejeitos de minas.

Palavras-chave: Sensoriamento Remoto; Turbidez, Rio Paraopeba, Sentinel-2

ABSTRACT

On January 25, 2019, a sudden failure of a mine tailing dam occurred in Brumadinho municipality, Minas Gerais State, Southern Brazil. A significant part of the 12 million m³ of mine tailings released after the failure discharged into the Paraopeba River, producing strong environmental and social impacts, mainly due to a huge increase in turbidity (occasionally exceeding 50,000 NTU). Remote sensing techniques can be efficiently applied to the monitoring of turbidity variations in surficial water bodies. Due to the regional importance of the Paraopeba River, this work aimed to develop an empirical model capable of producing turbidity estimates using images from the Sentinel-2 satellite.

The regression analyses indicated that turbidity correlates well with the spectral response of the near infrared band (Band 8) following an exponential model, with R² values of 0.91. The time series of turbidity estimated by Sentinel-2 imagery indicates that, during the dry season, the turbidity declined to pre-failure values and increased during the rainy season. Although the role of discharged tailing in the seasonal variation of turbidity remains largely undetermined, the model proposed in the present work allows the monitoring of turbidity variations in the Paraopeba River related to seasonal resuspension or deposition of mine tailings.

Keywords: Remote Sensing; Turbidity, Paraopeba River, Sentinel 2

Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	8
2. MATERIAIS E MÉTODOS	10
2.1. Caracterização da área de estudos	10
2.2. Caracterização da turbidez antes do rompimento da barragem.....	11
2.3. Aquisição e processamento das imagens Sentinel-2.....	11
2.4. Monitoramento de turbidez <i>in situ</i>	12
2.5. Determinação de um modelo empírico para estimativas de turbidez	13
3. RESULTADOS	14
3.1. Turbidez precedendo a ruptura da barragem de rejeito de mina.....	14
3.2. Monitoramento de turbidez após a ruptura da barragem de rejeito da mina.....	15
3.3. Regressão dos valores de refletância e resolução espacial.....	17
3.4. Séries temporais de turbidez derivadas do modelo empírico.....	18
4. DISCUSSÃO.....	20
5. CONCLUSÕES.....	23
6. REFERENCIAS	24

1. INTRODUÇÃO

A turbidez representa um parâmetro óptico usado para medir a qualidade da água. Este parâmetro mede a quantidade de dispersão de luz resultante da interação entre a luz incidente e o material suspenso na água. A turbidez aumenta conforme a quantidade de materiais em suspensão na água também aumenta e, consequentemente, a intensidade da luz espalhada diminui (DAVAIES-COLLE e SMITH, 2001).

O aumento antropogênico na turbidez impactou negativamente a ecologia aquática local de maneiras diferentes (por exemplo, KIRK, 1985; HENLEY et al., 2000; DAVIES-COLLEY e SMITH, 2001; BILOTTA e BRAZIER, 2008). O impacto crítico da turbidez na ecologia aquática está relacionado à taxa de atenuação do fluxo solar com profundidade, o que pode diminuir muito a profundidade eufótica de um corpo de água (HENLEY et al., 2000). Devido à diminuição da proporção de eufóticos de profundidade, houve um declínio significativo nas cadeias alimentares locais, começando no nível trófico primário (KIRK, 1985; HENLEY et al., 2000; BILOTTA e BRAZIER, 2008). Além disso, a turbidez da água potável não deve exceder 5 NTU e deve estar preferencialmente abaixo de 1 NTU (WHO, 2017). Uma alta concentração de sólidos na água resulta em uma diminuição na potabilidade deste recurso, tornando-o impróprio para consumo.

A turbidez varia amplamente em resposta ao tipo, composição, tamanho e geometria de partículas suspensas (DAVIES-COLLEY e SMITH, 2001). Devido ao contexto natural e antropogênico da bacia hidrográfica, a amplitude da turbidez, relatada em diferentes rios, varia em diversas ordens de magnitude (e.g., HUANG et al., 1992; WASS et al., 1997; GÖRANSSON et al., 2013; KUHL et al., 2019). Entre os agentes antrópicos que aumentam a turbidez da água superficial, a atividade de mineração é reconhecida como um dos fatores mais importantes, elevando a turbidez da água superficial em todo o mundo (e.g., THOMAS et al., 2003; PETTICREW et al., 2015; RUDORFF et al., 2018; HAMILTON et al., 2020).

Como a turbidez da água representa uma propriedade óptica, pode ser correlacionada com a resposta espectral obtida de imagens de satélite (por exemplo, PEREIRA et al., 2018; CABALLERO et al., 2018; KUHN et al., 2019). A avaliação quantitativa da turbidez do rio por meio de técnicas de sensoriamento remoto foi

demonstrada por vários estudos (por exemplo, WASS et al., 1997; PETUS et al., 2010; PEREIRA et al., 2018; SAKUNO et al., 2018; KUHN et al., 2019). A estimativa de turbidez por sensoriamento remoto é baseada na associação empírica entre a resposta espectral de imagens de satélite e os valores de turbidez medidos no campo. Esta abordagem representa uma conquista econômica na gestão da qualidade da água, permitindo a medição contínua de grandes regiões (CABALLERO et al., 2018). A aquisição de imagens de satélite em diferentes períodos permite a avaliação das mudanças temporais de turbidez em corpos d'água superficiais, proporcionando uma ferramenta de monitoramento e gestão.

Em 25 de janeiro de 2019, o rompimento da barragem de rejeitos de mineração de ferro situado no município de Brumadinho, localizado no estado de Minas Gerais, sudeste do Brasil, liberou aproximadamente 12 milhões de m³ de rejeitos. Grande parte destes rejeitos liberados alcançou o Rio Paraopeba, importante rio da região, causando graves danos ambientais e sociais. O abastecimento de água às comunidades ribeirinhas, que se beneficiam desse corpo d'água, foram diretamente afetados (POLIGNANO e LEMOS, 2020). Imediatamente após o rompimento da barragem, a qualidade da água foi monitorada diariamente para avaliar o efeito de longo prazo da presença de rejeitos de mineração no rio. O impacto mais crítico foi observado com relação à turbidez, que atingiu valores acima de 50.000 NTU. Visando obter uma ferramenta adequada para monitorar a variação temporal-espacial da turbidez em um rio impactado por introgressão de rejeito de mina, este trabalho teve como objetivo desenvolver um modelo para prever a turbidez através da resposta espectral das imagens do Sentinel-2.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Caracterização da área de estudos

A área estudada está localizada no centro-sul de Minas Gerais, Brasil, na região do “Quadrilátero Ferrífero”, região que representa o maior índice de extração de minério de ferro do Brasil. Possuindo ótima diversidade geológica, a região vem explorando mineração desde o período colonial. O Rio Paraopeba é um dos principais afluentes do Rio São Francisco, com extensão de aproximadamente 510 km e sua bacia hidrográfica cobre 13.643 km², incluindo o território de 35 municípios. A nascente do Rio Paraopeba está localizada no sul do município de Cristiano Ottoni, e sua foz está localizada no reservatório de Três Marias, no município de Felixlândia.

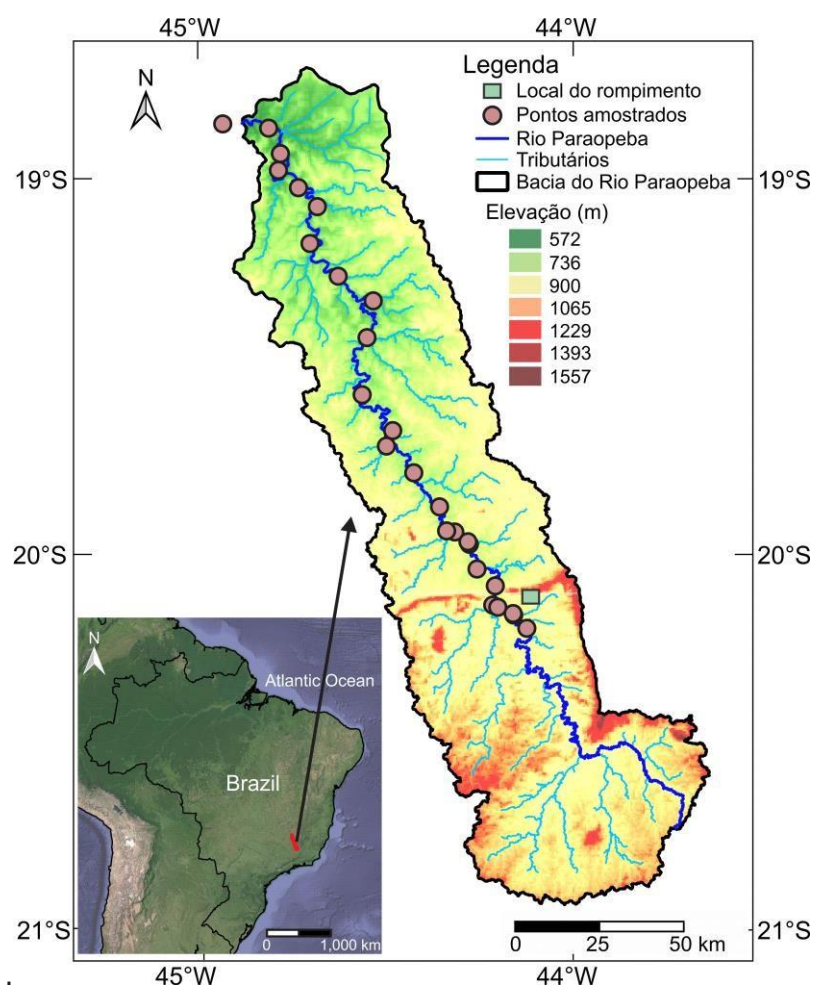


Figura 1 – Localização da área de estudo, com os limites da Bacia do Rio Paraopeba e os pontos de medição in situ da turbidez.

Fonte: Elaborado pelo autor

Em 25 de janeiro de 2019, houve uma falha abrupta em uma barragem de resíduos, liberando 12 milhões de m³ de rejeitos, a maioria deles despejando no Rio Paraopeba. Imediatamente após o rompimento da barragem e da descarga de um grande volume de rejeitos, os valores de turbidez aumentaram em três ou quatro ordens de magnitude maiores do que aquelas naturalmente observadas no Rio Paraopeba, com valores superiores a 50.000 NTU em janeiro. Devido à riqueza de óxidos de ferro do rejeito de mina, as plumas de turbidez geradas pelo rejeito da mina eram muito densas, com cores variando de avermelhado a acastanhado. (TERAMOTO et al., 2020)

2.2. Caracterização da turbidez antes do rompimento da barragem

Para avaliar o impacto gerado pelo aumento da turbidez, com a entrada de rejeitos no Rio Paraopeba, é fundamental considerar a variabilidade natural de Turbidez do Rio Paraopeba, ou seja, no período anterior ao rompimento da Barragem. O IGAM (INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS) e ANA (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS) conduziram a compilação de dados entre os anos de 2012 e 2018. As informações do monitoramento estão disponíveis nos sites do IGAM e ANA.

É possível identificar a tendência de aumento do índice de turbidez do Rio Paraopeba durante o período chuvoso entre os meses de outubro e março e, posteriormente, a queda nos meses secos, entre abril e setembro. Portanto, anteriormente ao rompimento da barragem (2012 e 2018), se verifica um comportamento sazonal de turbidez. A figura 2 demonstra que a turbidez aumenta com o aumento da precipitação, sendo possível observar que a turbidez na estação chuvosa é significativamente maior do que na estação seca.

2.3. Aquisição e processamento das imagens Sentinel-2

As imagens sem a presença de nuvens, do satélite multiespectral Sentinel-2, para correlacionar a resposta espectral do Rio Paraopeba com a turbidez resultante de mudanças espaço-temporais. O satélite Sentinel-2

pertence ao Programa de Monitoramento Global para Meio Ambiente e Segurança (GMES), administrado pela Comunidade Europeia e pela Agência Espacial Europeia (ESA). As imagens brutas obtidas corresponderam a produtos de Nível 1C (L1C) no topo de Atmosfera (TOA). No presente estudo, a análise foi realizada usando imagens do bloco 29SQA (sistema de grade de missão Sentinel-2).

Posteriormente, o processador de correção atmosférica Sen2Cor, desenvolvido pela Telespazio VEGA Deutschland GmbH em nome da ESA, foi usado para o processamento das imagens. O Sen2Cor visa processar produtos de topo da atmosfera (TOA)¹ de nível 1C, fornecendo produtos de refletância de fundo da atmosfera (BOA)² Nível 2A. O Sen2cor, a partir da entrada de produtos com dados de refletância aparente, os converte para refletância de superfície (MALENOVSKÝ et al., 2012). O algoritmo é baseado em um conjunto de 24 LUT (Look Up Table), que cobre a maioria das condições atmosféricas terrestres e recria valores para gerar uma imagem por meio do processamento de correção atmosférica. Para a correção, o software consiste em um conjunto de módulos orientados a linha de comando escritos na linguagem de programação Python. A refletância BOA foi obtida dividindo refletância TOA por Quantification_value (Equação 1)

$$BOA = TOA / Quantification_value \quad (1)$$

2.4. Monitoramento de turbidez *in situ*

Os dados de turbidez *in situ* foram coletados ao longo do Rio Paraopeba. A pesquisa *in situ* baseou-se em 49 estações onde a turbidez foi monitorada diariamente entre janeiro de 2019 a dezembro de 2020 (Figura 1). Esses pontos estão espalhados a jusante da Barragem do Feijão, ao longo dos aproximadamente 300 km de curso d'água entre a barragem e sua foz no Reservatório de Três Marias.

¹ Top of Atmosphere (TOA)

² Bottom of Atmosphere (BOA)

2.5. Determinação de um modelo empírico para estimativas de turbidez

Com base nos resultados apresentados por Chen et al. (2007), Nechad et al. (2010), Dogliotti et al. (2015), Caballero et al. (2018), Sakuno et al. (2018) e Rudolf et al. (2018), espera-se que os valores de turbidez possam ser obtidos por modelos empíricos baseados em um modelo de banda única. Portanto, este trabalho focou nesta abordagem, para obter um modelo empírico representativo. Para tanto, foram extraídos os valores de refletância das imagens Sentinel-2, nos mesmos pontos de onde houve a medição de turbidez *in-situ*, e esses valores foram comparados com os valores de turbidez medidos em campo.

A partir da construção de um gráfico de dispersão dos valores de turbidez versus os dados de refletância das Bandas 2 a 8A, do satélite Sentinel-2, ajustes de regressão não lineares foram feitos para identificar a banda capaz de reproduzir a variação de turbidez *in-situ*, avaliando os valores obtidos na determinação coeficiente (R^2). A banda que ofereceu os maiores valores de R^2 foi considerada a mais representativa para estimativas de turbidez. As equações derivadas da análise de regressão com os maiores valores de R^2 foram considerados as mais apropriados para estimar a turbidez do Rio Paraopeba a partir de imagens Sentinel-2.

3. RESULTADOS

3.1. Turbidez precedendo a ruptura da barragem de rejeito de mina

A turbidez apresenta comportamento sazonal e cíclico, com os maiores valores sendo observados na estação chuvosa, quando o maior volume de água escoia através dos rios, e os menores valores em períodos de seca. Por este motivo, os dados compilados para turbidez entre os anos de 2012 e 2018, foram agrupados em períodos chuvosos e secos. A estação chuvosa corresponde ao período entre outubro e março, quando são registrados grandes volumes de precipitação. Em contraste, o período seco corresponde ao período entre abril e setembro, quando volumes reduzidos de precipitação são registrados.

A Figura 2 apresenta um diagrama de caixa, comparando as variações dos valores de turbidez registrados nas estações chuvosa e seca; é possível observar que a turbidez na estação chuvosa é significativamente maior do que na estação seca. A turbidez média registrada na estação chuvosa é de 88,13 NTU, enquanto na estação seca, é de 20,56 NTU.

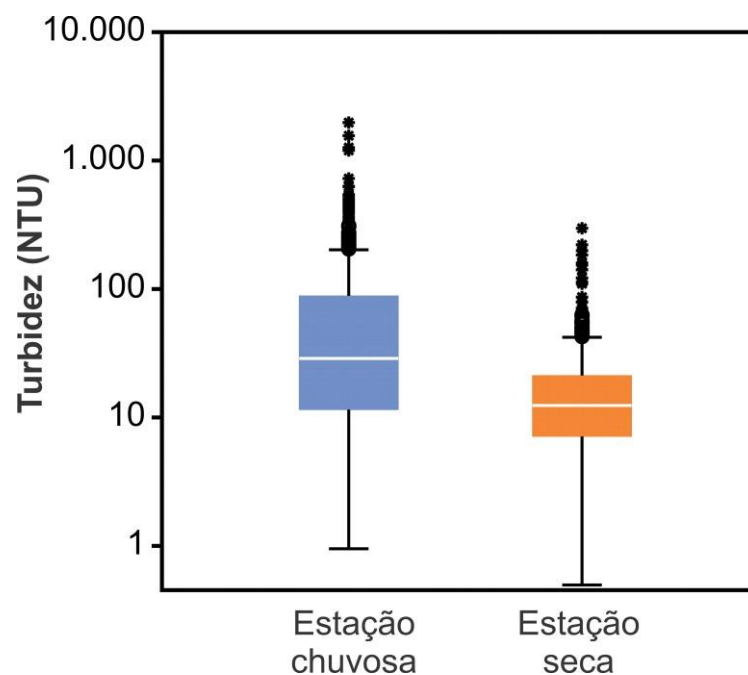


Figura 2 – Diagrama de caixa para os valores de turbidez nos períodos chuvoso (outubro a março) e seco (abril a setembro) entre 2012 e 2018. Os valores de turbidez são apresentados em uma escala logarítmica.

Fonte: Elaborado pelo autor

Observe a presença de *outliers*, com valores Acima de 500 NTU, principalmente durante a estação chuvosa. Apenas três amostras apresentaram valores de turbidez acima de 1.000 NTU, revelando que valores de turbidez extremamente elevados eram incomuns antes da introgressão do resíduo de mina no Rio Paraopeba.

3.2. Monitoramento de turbidez após a ruptura da barragem de rejeito da mina

Os resultados do monitoramento para os meses de janeiro a dezembro de 2019 são apresentados nos diagramas de *boxplot* mostrados na Figura 3. A figura 3 mostra um aumento progressivo nos valores medianos de turbidez, atingindo seu pico em março e queda nos meses seguintes. A menor turbidez registrada foi observada nos meses de agosto e setembro, período mais seco do ano. Notavelmente, os valores registrados da estação seca de 2019 foram substancialmente acima daqueles observados em períodos de seca, anteriores ao rompimento da barragem (Figura 2). Durante o início da estação chuvosa em setembro, as medianas dos valores de turbidez aumentaram, atingindo valores mais próximos aos observados durante fevereiro e março.

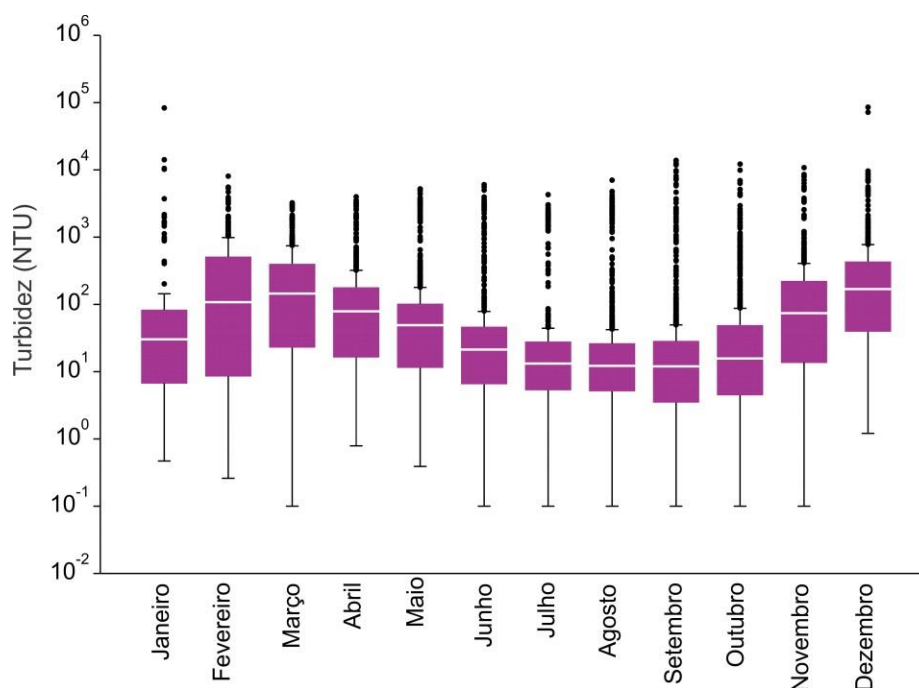


Figura 3 – Variações nos valores de turbidez entre janeiro e dezembro de 2019. A linha central dentro da caixa representa a mediana, e os limites superior e inferior da caixa representam, respectivamente, os valores do primeiro e terceiro quartis.

Fonte: Elaborado pelo autor

O movimento da pluma de turbidez foi mediado por advecção do movimento do fluxo do Rio Paraopeba, e atingiu o reservatório Retiro Baixo, localizado a cerca de 270 km abaixo do local do rompimento da barragem, 2 meses depois. A figura 4 mostra a composição de cor verdadeira do reservatório Retiro Baixo em três diferentes períodos.

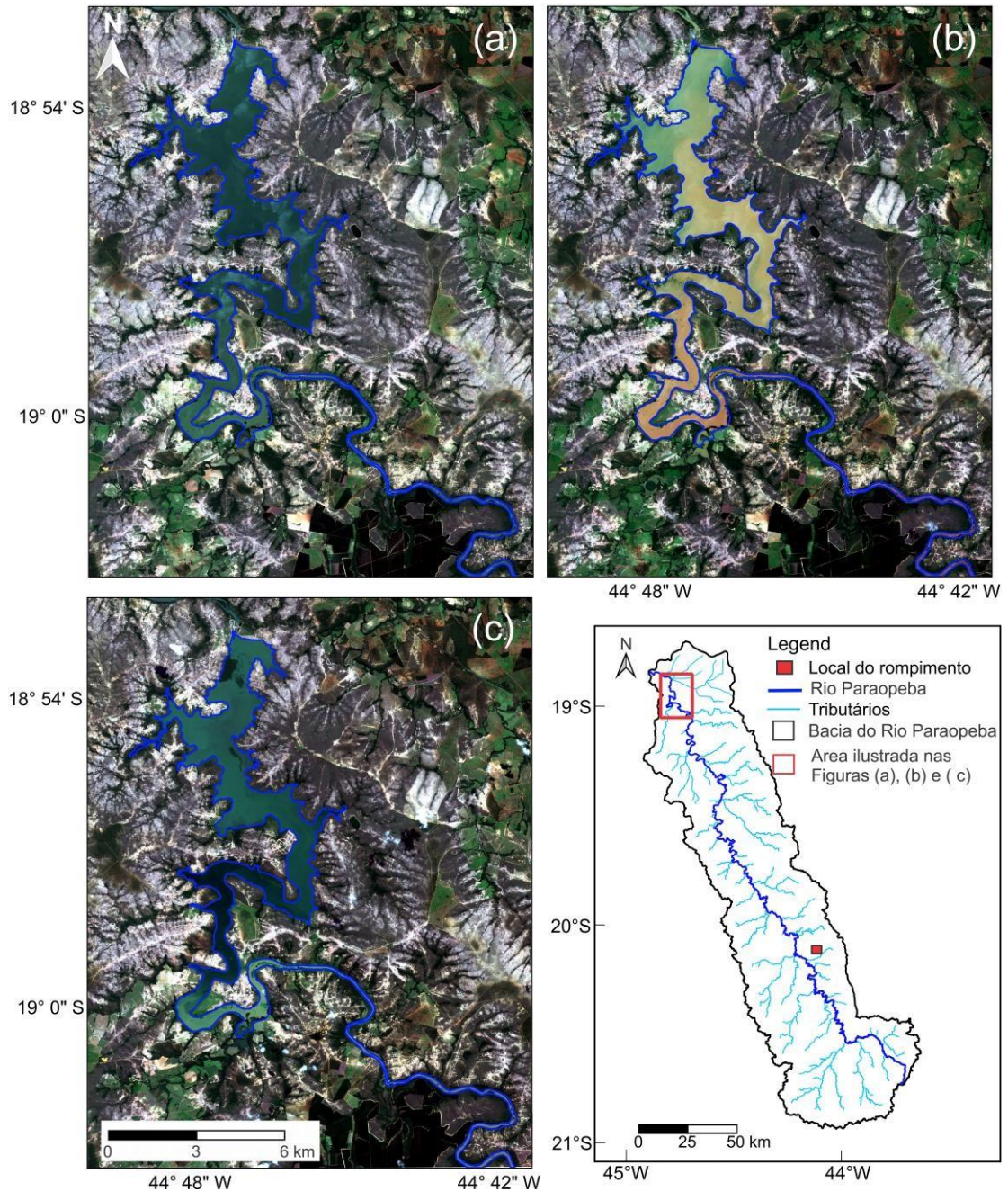


Figura 4 – Composição de cor verdadeira RGB em três períodos distintos: a) 22/01/2019, três dias antes do rompimento da barragem de rejeito da mina, quando os valores de turbidez foram reduzidos; b) 03/08/2019, 42 dias após o rompimento da barragem de rejeito da mina, quando a pluma de turbidez atingiu a barragem; c) 27/05/2019, 122 dias após o rompimento da barragem de rejeito da mina, quando grande parte da pluma de turbidez foi dissipada..

Fonte: Elaborado pelo autor

A primeira imagem (Figura 4a), de 22 de janeiro de 2019, três dias antes do rompimento da Barragem I, apresenta valores reduzidos de turbidez da água. A figura 4b mostra a chegada da pluma de turbidez ao Reservatório Retiro Baixo em março de 2019, quando os valores de turbidez foram fortemente aumentados. A Figura 4c mostra a turbidez em 27 de maio de 2019, período em que a turbidez atenuou.

3.3. Regressão dos valores de refletância e resolução espacial.

A análise de regressão não linear revelou que o modelo exponencial fornece o melhor ajuste para a resposta espectral dos dados de dispersão em 87 pontos de coletas de valores turbidez, medidos in situ. A Figura 5 mostra a regressão não linear dos valores de turbidez com a refletância da Banda 8 (infravermelho próximo), com o R^2 valores de 0,91. A medição dos valores in situ e o registro da cena Sentinel-2 foram realizadas em dias coincidentes, permitindo a comparação entre os valores de turbidez e reflectância nos diferentes pontos de amostragem.

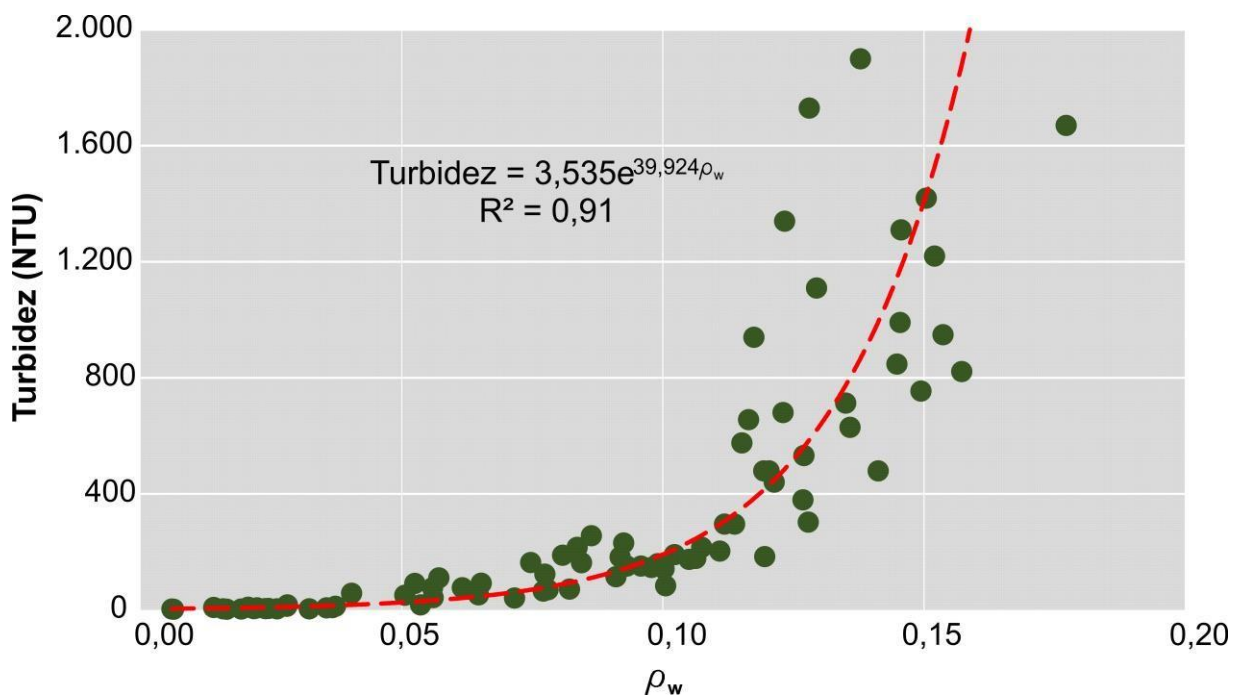


Figura 5 – Gráfico de dispersão dos valores de refletância da banda do infravermelho (Banda 8) e turbidez com ajuste de modelo exponencial.

Fonte: Elaborado pelo autor

A partir de ajustes usando o método dos mínimos quadrados, equações não lineares foram obtidas, produzindo estimativas de turbidez na Banda 8, apresentada na Equação 2.

$$Turbidity = 3.535 * e^{39.924 * pw} \quad (2)$$

3.4. Séries temporais de turbidez derivadas do modelo empírico

Para avaliar a consistência do modelo empírico proposto, foram obtidos mapas de estimativa de turbidez a partir da aplicação da Equação 2, usando imagens do satélite Sentinel-2. Estes mapas foram produzidos nos períodos anteriores e posteriores à ruptura da barragem de rejeito da mina (Figura 6). A distribuição da estimativa de turbidez em 22 de janeiro de 2019 (Figura 6a), 3 dias antes do rompimento da barragem de rejeitos de mina, apresentou valores abaixo de 100 NTU. Por outro lado, em 8 de março de 2019 (Figura 6b), 42 dias após o rompimento da barragem, mostra-se notavelmente altos valores de turbidez, atingindo valores acima de 500 NTU, demonstrando o transporte de uma grande quantidade de material suspenso. A turbidez estimada em 27 de maio 2019 (Figura 6c), 122 dias após o incidente, mostra uma redução de turbidez em comparação com março (Figura 6a). Durante setembro de 2019, no final da estação seca, a turbidez atingiu seus valores mais baixos (Figura 6d), devido à redução da vazão do rio observada neste período.

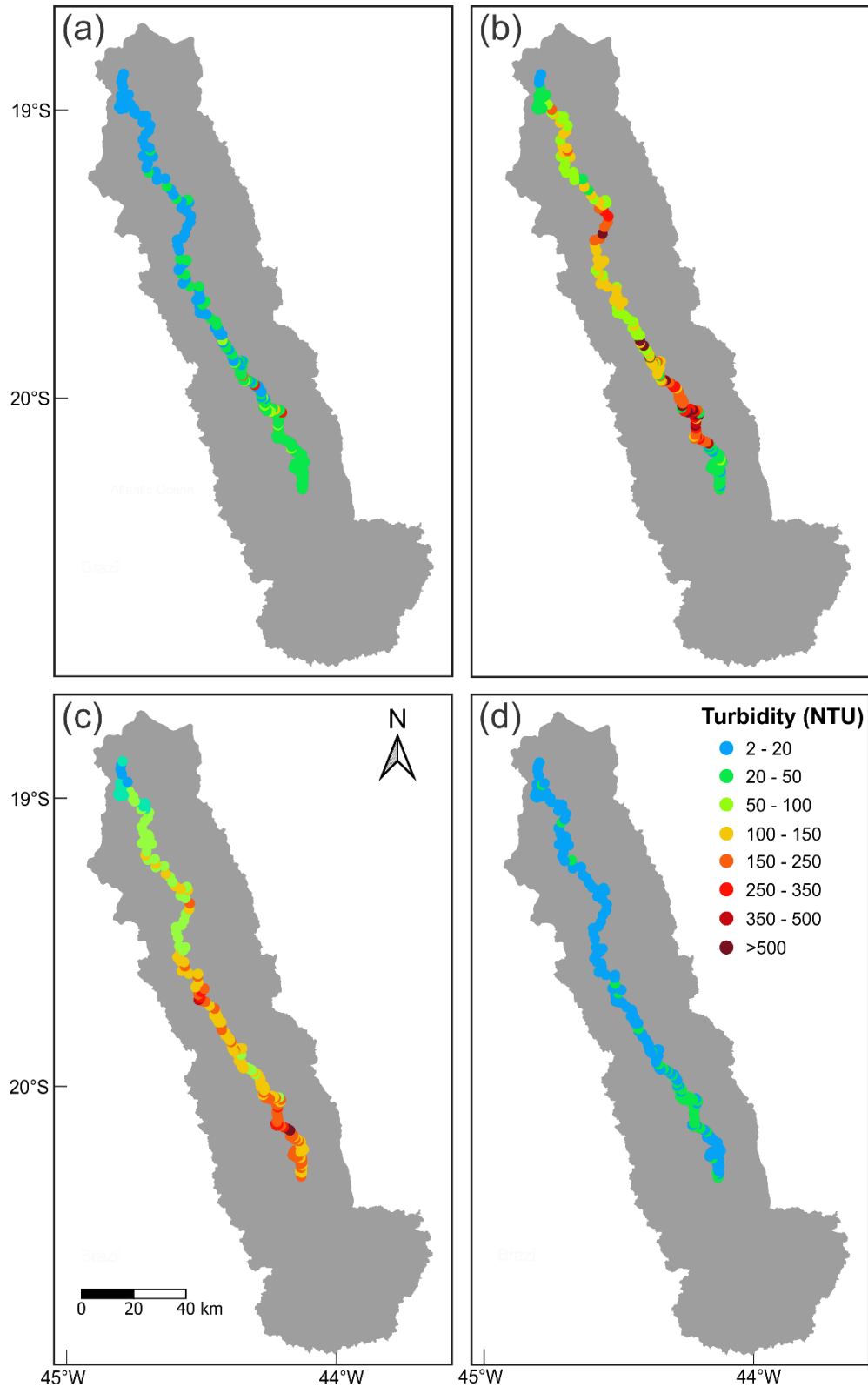


Figura 6 – Mapa de distribuição da estimativa de turbidez em 206 pontos distribuídos ao longo do curso do Rio Paraopeba: a) 22 de janeiro de 2019; b) 8 de março de 2019; c) 27 de maio de 2019; d) 19 de setembro de 2019.

Fonte: Elaborado pelo

4. DISCUSSÃO

O Rio Paraopeba é uma importante fonte de abastecimento de água e irrigação para diversos municípios da região central de Minas Gerais, e um dos principais afluentes do Rio São Francisco. Por este motivo, a determinação da qualidade da água do Rio Paraopeba é uma importante questão social e econômica. A verdadeira magnitude dos impactos ambientais decorrentes da entrada de resíduos de mineração no Rio Paraopeba ainda é incerta. Nesse contexto, o monitoramento da qualidade da água é de fundamental importância para avaliar os impactos negativos de longo prazo da introgressão dos rejeitos no Rio Paraopeba. O forte aumento nos valores de turbidez representa o principal impacto ambiental associado ao rompimento da barragem de rejeitos, tornando a água do Rio Paraopeba imprópria para consumo humano. Consequentemente, o desenvolvimento de técnicas para monitorar a turbidez tem alta relevância social e ambiental.

Os resultados apresentados no presente trabalho indicam que, para as características do local (largura do corpo d'água e natureza dos materiais suspensos), a faixa do infravermelho próximo (Banda 8) oferece o melhor ajuste para turbidez, permitindo o monitoramento da variação da turbidez ao longo do tempo. Vale ressaltar que, devido à resolução temporal média de 6 dias, o Sentinel-2 permite a construção de uma série histórica detalhada. Por este motivo, o acompanhamento sistemático de variações de turbidez no Rio Paraopeba pode ser conduzido, alternativamente, usando técnicas de sensoriamento remoto. Embora o monitoramento proposto neste trabalho não tenha a mesma precisão das medições realizadas em campo, ainda assim pode oferecer a possibilidade de monitorar o Rio Paraopeba, de forma contínua, em toda a sua extensão.

Embora técnicas de sensoriamento remoto tenham sido demonstradas em estudos anteriores para regiões costeiras (por exemplo, Petus et al., 2010; Nechad et al., 2010; Dogliotti et al., 2015) e lagos (SAKUNO et al., 2010), poucos estudos demonstraram sua aplicação para monitoramento de turbidez em rios. Este trabalho possibilitou a identificação de um modelo que permite estimativas consistentes de turbidez a partir de imagens do satélite Sentinel-2 no Rio Paraopeba. É importante ressaltar que devido à especificidade com relação ao tipo e às características do material suspenso, o modelo empírico relacionado à turbidez e a resposta espectral

das imagens de satélite são específicos do local e, modelos desenvolvidos para outros locais, não devem ser usados para este caso.

Embora haja uma grande diversidade de modelos para produzir estimativas confiáveis de turbidez, com base na resposta espectral de imagens de satélite, alguns deles são baseados em um modelo de banda única, uma abordagem mais simplista, que correlaciona a turbidez com uma variação de uma refletância de comprimento de onda particular (por exemplo, DOGLIOTTI et al., 2015; GUO et al., 2017; CABALLERO et al., 2019). Apesar de sua simplicidade, este trabalho demonstra que, para o caso da água do Rio Paraopeba, impactado pelo despejo de rejeito de mina, a abordagem de modelo único produz estimativas confiáveis de turbidez. É importante ressaltar que a evolução temporal da turbidez estimada por este modelo (Figura 6) assemelha-se muito às medidas em campo (Figura 3), em que os maiores valores foram observados em fevereiro e março, e decrescendo em meses consecutivos, atingindo os menores valores em Setembro, no final da estação seca. Assim, o modelo é capaz de produzir séries temporais confiáveis de turbidez, e pode ser usado como uma ferramenta complementar para estimar o comportamento espaço-temporal deste parâmetro. Apesar da capacidade deste modelo empírico, de produzir estimativas consistentes de turbidez, este modelo é específico do local e serve para monitorar as condições geológicas da área estudada, impactada por rejeitos ricos em ferro.

O resultado encontrado para a análise do Rio Paraopeba, representado pela maior compatibilidade espectral, ocorreu na Banda 8 ($\lambda = 842 \text{ nm}$). O modelo para esta análise em águas continentais difere do encontrado por Caballero et al., (2018), onde o modelo para águas marinhas apresentou resposta espectral pronunciada para a banda ($\lambda = 865 \text{ nm}$). A análise de regressão indica que o modelo exponencial melhor se ajusta aos dados de turbidez em função da resposta espectral da banda analisada. Este fato é justificado pelo fato de a turbidez apresentar variações de várias ordens de magnitude, enquanto a refletância varia linearmente, entre 0 e 1. Nas análises de regressão realizadas e ilustradas, o desvio dos dados da curva ajustada aumenta à medida que a turbidez aumenta (Figura 5), e isso pode sugerir a avaliação quantitativa da turbidez para turbidez extremamente alta. É provável que a discrepância com o aumento da turbidez possa estar associada a imprecisões do turbidímetro usado nesta faixa de turbidez ou pode ser que a resposta espectral nestes intervalos de turbidez produza contrastes insignificantes.

Para demonstrar a viabilidade de nosso modelo, foi construída uma série temporal de turbidez, calculada por modelo empírico (Figura 7), que são consistentemente semelhantes às medidas em campo (Figura 3). As vantagens desta abordagem, em relação à medição de campo da turbidez, estão relacionadas ao custo relativamente baixo de obtenção e a estimativa de todo o curso do rio.

A extensão real da contaminação por metais do Rio Paraopeba induzida pelo ingresso de resíduos de mina ainda é controversa. Alguns trabalhos têm demonstrado o intenso impacto do metal dissolvido na água do rio (SANTOS VIRGÍLIO et al., 2020; THOMPSON et al., 2020) e outros argumentam pela inviabilidade das características físico-químicas do rio em manter alta concentração de metais na forma dissolvida (TERAMOTO et al., 2020). Teramoto et al. (2020) verificaram um aumento de metais na forma total durante o período chuvoso, relacionado ao aumento de sedimentos em suspensão. Consequentemente, o aumento do movimento da pluma de turbidez pode representar o principal mecanismo de controle do transporte de metais na água do rio. Este cenário corresponde perfeitamente com alguns trabalhos associando o transporte de metal com turbidez (por exemplo, NASRABADI et al., 2016; SWAIN e SAHOO, 2017).

A extensão da distribuição de rejeitos de mina no leito do Rio Paraopeba é amplamente indeterminada. O comportamento dos rejeitos de mina no Rio Paraopeba pode representar um fenômeno sazonal, em que se espera que a ressuspensão ocorra junto com o aumento da vazão do rio. Por outro lado, durante as temporadas de seca, o fluxo do rio diminui consideravelmente, e os rejeitos de minas transportados são depositado no leito do rio. Portanto, este modelo serve como uma ferramenta valiosa, permitindo o monitoramento de longo prazo da turbidez do rio, servindo como um critério consistente para avaliar a qualidade da água.

5. CONCLUSÕES

O enorme impacto do rompimento da barragem de rejeitos de mina na qualidade da água do Rio Paraopeba ainda é fonte de preocupação. Embora as dinâmicas de longo prazo dos rejeitos de minas descartados ainda sejam desconhecidas, o monitoramento da qualidade da água é uma questão crucial. Entre os efeitos negativos reconhecidos da introgressão de rejeito de mina, o aumento da turbidez é o mais importante.

Uma vez que turbidez representa uma propriedade óptica, pode ser reconhecida pela resposta do espectro de imagens de satélite. Como estratégia para monitorar a variação sazonal de turbidez, foram combinados 87 pontos de análise de turbidez medida *in situ*, e resposta espectral do Satélite Sentinel-2, encontrando um modelo exponencial que previu a distribuição de turbidez em corpos d'água superficiais, usando a resposta espectral de infravermelho próximo da Banda 8 ($\lambda = 865 \text{ nm}$), com R^2 de 0,91.

Assim, este trabalho reforça a capacidade da abordagem de sensoriamento remoto para monitorar as propriedades de corpos d'água superficiais, e o enfoque de banda única permite a obtenção de alguns modelos muito representativos, apesar da simplicidade da abordagem. Além disso, os modelos que preveem a turbidez da resposta espectral são casos específicos, e o modelo obtido neste trabalho não é capaz de produzir previsões consistentes em outros locais que possuam composição e características dos materiais em suspensão distintas.

Descobriu-se que o desvio dos dados de campo ao modelo produzido aumenta à medida que a turbidez aumenta, mas se aproximam da faixa mais comum de turbidez medida no local. É importante ressaltar que este modelo permite uma estratégia fácil e de baixo custo para monitorar a turbidez, avaliando a longa dinâmica de longo prazo de rejeitos de minas descarregados ao longo do tempo ao longo do curso do Rio Paraopeba.

6. REFERENCIAS

- BILOTTA, G.s.; BRAZIER, R.e.. Understanding the influence of suspended solids on water quality and aquatic biota. **Water Research**, [S.L.], v. 42, n. 12, p. 2849-2861, jun. 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2008.03.018>.
- CABALLERO, Isabel; STUMPF, Richard; MEREDITH, Andrew. Preliminary Assessment of Turbidity and Chlorophyll Impact on Bathymetry Derived from Sentinel-2A and Sentinel-3A Satellites in South Florida. **Remote Sensing**, [S.L.], v. 11, n. 6, p. 645-665, 16 mar. 2019. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/rs11060645>.
- CHEN, Zhiqiang; HU, Chuanmin; MULLER-KARGER, Frank. Monitoring turbidity in Tampa Bay using MODIS/Aqua 250-m imagery. **Remote Sensing Of Environment**, [S.L.], v. 109, n. 2, p. 207-220, jul. 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2006.12.019>.
- DAVIES-COLLEY, R. J.; SMITH, D. G.. TURBIDITY SUSPENDED SEDIMENT, AND WATER CLARITY: a review. **Journal Of The American Water Resources Association**, [S.L.], v. 37, n. 5, p. 1085-1101, out. 2001. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1752-1688.2001.tb03624.x>.
- DOGLIOTTI, A.I.; RUDDICK, K.G.; NECHAD, B.; DOXARAN, D.; KNAEPS, E.. A single algorithm to retrieve turbidity from remotely-sensed data in all coastal and estuarine waters. **Remote Sensing Of Environment**, [S.L.], v. 156, p. 157-168, jan. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2014.09.020>.
- GÖRANSSON, G.; LARSON, M.; BENDZ, D.. Variation in turbidity with precipitation and flow in a regulated river system – river Göta Älv, SW Sweden. **Hydrology And Earth System Sciences**, [S.L.], v. 17, n. 7, p. 2529-2542, 8 jul. 2013. Copernicus GmbH. <http://dx.doi.org/10.5194/hess-17-2529-2013>.
- GUO, Kai; ZOU, Tao; JIANG, Dejuan; TANG, Cheng; ZHANG, Hua. Variability of Yellow River turbid plume detected with satellite remote sensing during water-sediment regulation. **Continental Shelf Research**, [S.L.], v. 135, p. 74-85, mar. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.csr.2017.01.017>.
- HAMILTON, Andrew K.; LAVAL, Bernard E.; PETTICREW, Ellen L.; ALBERS, Sam J.; ALLCHIN, Michael; BALDWIN, Susan A.; CARMACK, Eddy C.; DÉRY, Stephen J.; FRENCH, Todd D.; GRANGER, Brody. Seasonal Turbidity Linked to Physical Dynamics in a Deep Lake Following the Catastrophic 2014 Mount Polley Mine Tailings Spill. **Water Resources Research**, [S.L.], v. 56, n. 8, ago. 2020. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1029/2019wr025790>.

HENLEY, W. F.; PATTERSON, M. A.; NEVES, R. J.; LEMLY, A. Dennis. Effects of Sedimentation and Turbidity on Lotic Food Webs: a concise review for natural resource managers. **Reviews In Fisheries Science**, [S.L.], v. 8, n. 2, p. 125-139, abr. 2000. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/10641260091129198>.

HUANG, Wei Wen; JING, Zhang; ZHOU, Zeng Hao. Particulate element inventory of the Huanghe (Yellow River): a large, high-turbidity river. **Geochimica Et Cosmochimica Acta**, [S.L.], v. 56, n. 10, p. 3669-3680, out. 1992. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0016-7037\(92\)90160-k](http://dx.doi.org/10.1016/0016-7037(92)90160-k).

(IGAM), Instituto Mineiro de Gestão das Águas. **Monitoramento da Qualidade das Águas**. Disponível em: <http://www.igam.mg.gov.br/monitoramento-da-qualidade-das-aguas2>. Acesso em: 22 out. 2020.

KIRK, John T. O.. Effects of suspensoids (turbidity) on penetration of solar radiation in aquatic ecosystems. **Hydrobiologia**, [S.L.], v. 125, n. 1, p. 195-208, jun. 1985. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/bf00045935>

KUHN, Catherine; VALERIO, Aline de Matos; WARD, Nick; LOKEN, Luke; SAWAKUCHI, Henrique Oliveira; KAMPEL, Milton; RICHEY, Jeffrey; STADLER, Philipp; CRAWFORD, John; STRIEGL, Rob. Performance of Landsat-8 and Sentinel-2 surface reflectance products for river remote sensing retrievals of chlorophyll-a and turbidity. **Remote Sensing Of Environment**, [S.L.], v. 224, p. 104-118, abr. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2019.01.023>.

MALENOVSKÝ, Zbyněk; ROTT, Helmut; CIHLAR, Josef; SCHAEPMAN, Michael E.; GARCÍA-SANTOS, Glenda; FERNANDES, Richard; BERGER, Michael. Sentinels for science: potential of sentinel-1, -2, and -3 missions for scientific observations of ocean, cryosphere, and land. **Remote Sensing Of Environment**, [S.L.], v. 120, p. 91-101, maio 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2011.09.026>.

NASRABADI, T.; RUEGNER, H.; SIRDARI, Z.Z.; SCHWIENTEK, M.; GRATHWOHL, P.. Using total suspended solids (TSS) and turbidity as proxies for evaluation of metal transport in river water. **Applied Geochemistry**, [S.L.], v. 68, p. 1-9, maio 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeochem.2016.03.003>.

NECHAD, B.; RUDDICK, K.G.; PARK, Y.. Calibration and validation of a generic multisensor algorithm for mapping of total suspended matter in turbid waters. **Remote Sensing Of Environment**, [S.L.], v. 114, n. 4, p. 854-866, abr. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2009.11.022>.

PEREIRA, Leticia S. F.; ANDES, Lisa C.; COX, Amanda L.; GHULAM, Abduwasit. Measuring Suspended-Sediment Concentration and Turbidity in the Middle Mississippi and Lower Missouri Rivers Using Landsat Data. **Jawra Journal Of The American Water Resources Association**, [S.L.], v. 54, n. 2, p. 440-450, 19 dez. 2017. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/1752-1688.126>.

PETTICREW, Ellen L.; ALBERS, Sam J.; BALDWIN, Susan A.; CARMACK, Eddy C.; DÉRY, Stephen J.; GANTNER, Nikolaus; GRAVES, Kelly E.; LAVAL, Bernard; MORRISON, John; OWENS, Philip N.. The impact of a catastrophic mine tailings impoundment spill into one of North America's largest fjord lakes: quesnel lake, british columbia, canada. **Geophysical Research Letters**, [S.L.], v. 42, n. 9, p. 3347-3355, 5 maio 2015. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1002/2015gl063345>.

PETUS, Caroline; CHUST, Guillem; GOHIN, Francis; DOXARAN, David; FROIDEFOND, Jean-Marie; SAGARMINAGA, Yolanda. Estimating turbidity and total suspended matter in the Adour River plume (South Bay of Biscay) using MODIS 250-m imagery. **Continental Shelf Research**, [S.L.], v. 30, n. 5, p. 379-392, mar. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.csr.2009.12.007>.

POLIGNANO, Marcus Vinicius; LEMOS, Rodrigo Silva. Rompimento da barragem da Vale em Brumadinho: impactos socioambientais na Bacia do Rio Paraopeba. **Ciência e Cultura**, São Paulo, v. 72, n. 2, p. 37-43, abr. 2020.

RUDORFF, Natalia; RUDORFF, Conrado M.; KAMPEL, Milton; ORTIZ, Gustavo. Remote sensing monitoring of the impact of a major mining wastewater disaster on the turbidity of the Doce River plume off the eastern Brazilian coast. **Isprs Journal Of Photogrammetry And Remote Sensing**, [S.L.], v. 145, p. 349-361, nov. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.02.013>.

SAKUNO, Yuj; YAJIMA, Hiroshi; YOSHIOKA, Yumi; SUGAHARA, Shogo; ELBASIT, Mohamed Abd; ADAM, Elhadi; CHIRIMA, Johannes. Evaluation of Unified Algorithms for Remote Sensing of Chlorophyll-a and Turbidity in Lake Shinji and Lake Nakaumi of Japan and the Vaal Dam Reservoir of South Africa under Eutrophic and Ultra-Turbid Conditions. **Water**, [S.L.], v. 10, n. 5, p. 618, 9 mai. 2018. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/w100506>.

SÉVERINE, Thomas; RIDD, Peter; DAY, Geoff. Turbidity regimes over fringing coral reefs near a mining site at Lihir Island, Papua New Guinea. **Marine Pollution Bulletin**, [S. L.], v. 46, n. 8, p. 1006-1014, ago. 2003.

SWAIN, Ratnakar; SAHOO, Bhabagrahi. Mapping of heavy metal pollution in river water at daily time-scale using spatio-temporal fusion of MODIS-aqua and Landsat satellite imageries. **Journal Of Environmental Management**, [S.L.], v. 192, p. 1-14, maio 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.01.034>.

TERAMOTO, E. H; GEMEINER, H; ZANATTA, M. B.; MENEGÁRIO, A. A.; CHANG, H. K. Metal speciation of the Paraopeba river after the Brumadinho dam failure. **Science Of The Total Environment**, [S. L.], v. 757, 25 fev. 2021.

THOMPSON, Fabiano; OLIVEIRA, Bráulio Cherene de; CORDEIRO, Marcelle Candido; MASI, Bruno P.; RANGEL, Thiago Pessanha; PAZ, Pedro; FREITAS, Thamires; LOPES, Grasielle; SILVA, Bruno Sergio; CABRAL, Anderson S.. Severe impacts of the Brumadinho dam failure (Minas Gerais, Brazil) on the water quality of the Paraopeba River. **Science Of The Total Environment**, [S.L.], v. 705, p. 135914, fev. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135914>.

VERGILIO, Cristiane dos Santos; LACERDA, Diego; OLIVEIRA, Bráulio Cherene Vaz de; SARTORI, Echily; CAMPOS, Gabriela Munis; PEREIRA, Anna Luiza de Souza; AGUIAR, Diego Borges de; SOUZA, Tatiana da Silva; ALMEIDA, Marcelo Gomes de; THOMPSON, Fabiano. Metal concentrations and biological effects from one of the largest mining disasters in the world (Brumadinho, Minas Gerais, Brazil). **Scientific Reports**, [S.L.], v. 10, n. 1, p. 1- 12, 3 abr. 2020. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-020-62700-w>.

WASS, P.D.; MARKS, S.D.; FINCH, J.W.; LEEKS, G.J.L.; INGRAM, J.K.. Monitoring and preliminary interpretation of in-river turbidity and remote sensed imagery for suspended sediment transport studies in the Humber catchment. **Science Of The Total Environment**, [S.L.], v. 194-195, p. 263-283, fev. 1997. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0048-9697\(96\)05370-3](http://dx.doi.org/10.1016/s0048-9697(96)05370-3).

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Guidelines for drinking-water quality**. World Health Organization. 1997.