

Utilização de imagem Landsat 8/OLI para detecção de óxido e hidróxido de ferro decorrente da ruptura da barragem de rejeito de Fundão, Mariana (MG)

João Victor Alves Ribeiro¹, Ana Clara Barbosa Cardoso², Alex J. Choupina Andrade Silva^{3,4*},
Leonardo Azevedo Sá Alkmin³

¹Graduando em Engenharia de Minas, Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri. (*Autor correspondente: jvalves04@gmail.com)

²Graduada em Engenharia de Minas, Nexa Resources, Brasil.

³Professor do Instituto de Engenharia, Ciência e Tecnologia, Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Brasil. (*Autor correspondente: alex.choupina@ufvjm.edu.br)

⁴Professor do Programa de Pós-graduação em Ciência, Tecnologia e Inovação, Instituto de Engenharia, Ciência e Tecnologia, Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Brasil.

Histórico do Artigo: Submetido em: 15/02/2025 – Revisado em: 04/04/2025 – Aceito em: 06/06/2025

RESUMO

O rompimento da barragem de Fundão, operada pelas empresas Samarco, Vale e BHP Billiton, no município de Mariana (MG), em 05/11/2015, é considerado um dos maiores desastres ambientais relacionados à mineração no Brasil e o maior do mundo envolvendo barragens de rejeitos. Este trabalho utiliza técnicas de sensoriamento remoto combinadas com geoprocessamento para a detecção e dispersão de óxidos e hidróxidos de ferro ao longo do trecho impactado pela lama oriunda da barragem. Por meio do *software* livre QGIS (*Quantum GIS*), foi aplicado o Índice de Óxidos Férricos (do inglês *Index Ferric Oxide* - IFO), que corresponde à razão entre a Banda 6 (B6) – infravermelho de ondas curtas e a Banda 5 (B5) – infravermelho próximo, com o objetivo de identificar áreas com concentrações de minerais de ferro depositados após o rompimento. Os dados de reflectância foram obtidos a partir de imagens capturadas pelos sensores *Operational Land Imager* (OLI) do satélite Landsat 8. Foram analisadas imagens de três períodos: 24/08/2015 (antes do rompimento), 12/11/2015 (dias após o rompimento) e 19/08/2022, permitindo acompanhar a evolução da dispersão dos rejeitos antes e depois do evento. Os resultados indicam altos valores de reflectância, variando de 0,9488 a 1,1335 μm , na imagem de 12/11/2015, compatíveis com o espectro da goethita [FeO(OH)]. Isso sugere concentrações significativas desse mineral nas áreas impactadas, especialmente no Córrego Santarém e no rio Gualaxo do Norte, abrangendo aproximadamente 7 km² em 2015. Os comprimentos de onda mais curtos ($\leq 0,5793 \mu\text{m}$) foram associados principalmente à vegetação, cobrindo cerca de 81% da área analisada em 2015 e mantendo a tendência em 2022. Os dados de 2022 mostram a presença de minerais ferrosos em uma área 3 vezes maior em relação àquela de 2015, atribuída ao aporte da lama de rejeito após o rompimento da barragem. Os resultados ressaltam o impacto contínuo dos rejeitos e a importância do sensoriamento remoto no monitoramento ambiental e na mitigação dos efeitos de desastres de mineração.

Palavras-Chaves: Índice de óxidos de ferro, Sensoriamento remoto, *Semi-Automatic Classification*, Reflectância espectral.

ABSTRACT

The rupture of the Fundão tailings dam, operated by Samarco, Vale, and BHP Billiton in Mariana (MG) on November 5, 2015, is considered one of the largest environmental disasters related to mining in Brazil and the largest in the world involving tailings dams. This study employs remote sensing techniques combined with geoprocessing to detect and track the dispersion of iron oxides and hydroxides along the section impacted by the dam's slurry. Using the open-source software QGIS (Quantum GIS), the Ferric Oxide Index (IFO)—defined as the ratio between Band 6 (B6), short-wave infrared, and Band 5 (B5), near infrared—was applied to identify areas with concentrations of iron minerals deposited after the rupture. Reflectance data were obtained from images captured by the Operational Land Imager (OLI) sensors onboard the Landsat 8 satellite. Images from three periods were analyzed: August 24, 2015 (before the rupture), November 12, 2015 (days after the rupture), and August 19, 2022, allowing the monitoring of tailings dispersion. Ribeiro, J.V.A., Cardoso, A.C.B.M., Andrade Silv, A.J.C., Sá Alkmin, L.A. (2025). Utilização de imagem Landsat 8/OLI para detecção de óxido e hidróxido de ferro decorrente da ruptura da barragem de rejeito de Fundão, Mariana (MG). *Revista Brasileira de Sensoriamento Remoto*, v.6, n.2, p.02-18.



evolution before and after the event. The results show high reflectance values, ranging from 0.9488 to 1.1335 μm , in the November 12, 2015 image, compatible with the spectrum of goethite [FeO(OH)]. This suggests significant concentrations of this mineral in the impacted areas, especially in the Santarém Creek and the Gualaxo do Norte River, covering approximately 7 km² in 2015. The shorter wavelengths ($\leq 0.5793 \mu\text{m}$) were primarily associated with vegetation, covering about 81% of the area analyzed in 2015 and maintaining a similar trend in 2022. The 2022 data shows the presence of ferrous minerals in an area 3 times larger than in 2015, attributed to the input of tailings sludge after the dam collapse. These findings underscore the ongoing impact of the tailings and the importance of remote sensing in environmental monitoring and in mitigating the effects of mining disasters.

Keywords: Ferric Oxides Index, Remote Sensing, Semi-Automatic Classification, Spectral reflectance.

1. Introdução

Atividades antrópicas voltadas à extração de recursos minerais impactam e alteram o meio ambiente, direta ou indiretamente, por meio da mineração. Embora essa atividade provoque efeitos ambientais significativos, o setor mineral é um importante gerador de emprego e renda, além de constituir a principal fonte de arrecadação e desenvolvimento para regiões com vocação mineradora (Mesquita, Carvalho e Ogando, 2016).

Em 5 de novembro de 2015, ocorreu uma das maiores catástrofes ambientais relacionadas à mineração no Brasil: o rompimento da barragem de rejeitos de Fundão, em Mariana (MG), operada pelas empresas Samarco, Vale e BHP Billiton. O complexo minerador contava com três barragens destinadas a receber os rejeitos do processo: Germano, Fundão e Santarém (Figura 1).

O desastre ambiental afetou severamente localidades próximas, como o distrito Bento Rodrigues, da cidade de Santa Rita Durão, provocando a destruição de comunidades e a contaminação do rio Doce — o principal curso d'água da região — e de rios afluentes, como o rio Gualaxo do Norte e o rio do Carmo. A contaminação comprometeu o abastecimento de água para mais de 500 mil pessoas, uma vez que os rejeitos dispersos poluíram as fontes de água potável (Sanchez et al., 2015).

Foram despejados aproximadamente 63 bilhões de litros de rejeitos, que levaram duas semanas para percorrer 879 quilômetros até alcançar o mar (Barros e Pamboukian, 2018). Durante esse trajeto, a lama causou danos diversos, incluindo o soterramento de nascentes, destruição de moradias e plantações, inviabilização do uso da terra no curto e médio prazo, perda de vidas humanas e impactos sociais e psicológicos profundos para as populações atingidas (San Sanchez et al., 2015).

Nesse contexto, o Sensoriamento Remoto e o Geoprocessamento têm se mostrado ferramentas eficazes para realizar uma análise ambiental refinada. Estudos destacam a utilidade dessas tecnologias na gestão ambiental, facilitando o gerenciamento de informações espaciais e oferecendo dados primários sobre a superfície terrestre de forma rápida e contínua, com custos relativamente acessíveis (ex.: Crepani et al., 2001; Jacinto, 2003; Ortiz e Freitas, 2005; Pons et al., 2007; Teódulo, 2014; Silva et al., 2017). Entre as diversas aplicações dessas tecnologias, destaca-se o uso de imagens de satélite, como as fornecidas pelo Landsat 8, equipadas com os sensores *Operational Land Instrument* (OLI). Esse recurso permite identificar superfícies com óxidos e hidróxidos de ferro por meio da reflectância espectral no infravermelho próximo (em inglês *Near Infrared* - NIR), com comprimento de onda entre 0,85 e 0,88 μm . Essa técnica é aplicada para identificar depósitos ferríferos e solos com alta concentração de óxidos e hidróxidos de ferro (ex.: Townsend, 1987; Dogan, 2008; Ciampalini et al., 2013; Ducart et al., 2016; Arisanty et al., 2021; Abay et al., 2022; Odunuga et al., 2023). Além disso, há trabalhos voltados ao monitoramento de áreas aquáticas afetadas por lamas de rejeitos, com o objetivo de mensurar o impacto ambiental de rompimentos de barragens de mineração (Freire et al., 2021; Lucchetti e Oliveira, 2021; Pires et al., 2023).

Estudos recentes, como os realizados em Brumadinho (MG), têm aplicado diferentes índices espectrais para delimitar com maior precisão as áreas impactadas por rejeitos de mineração. Considerando essa abordagem, este artigo tem como objetivo aplicar o Índice de Óxido Férrico (em inglês, *Ferric Oxides Index* -

IFO; Henrich, 2024) como uma ferramenta para detectar e mapear a dispersão de óxidos e hidróxidos de ferro ao longo das áreas afetadas pela lama da barragem de Fundão.

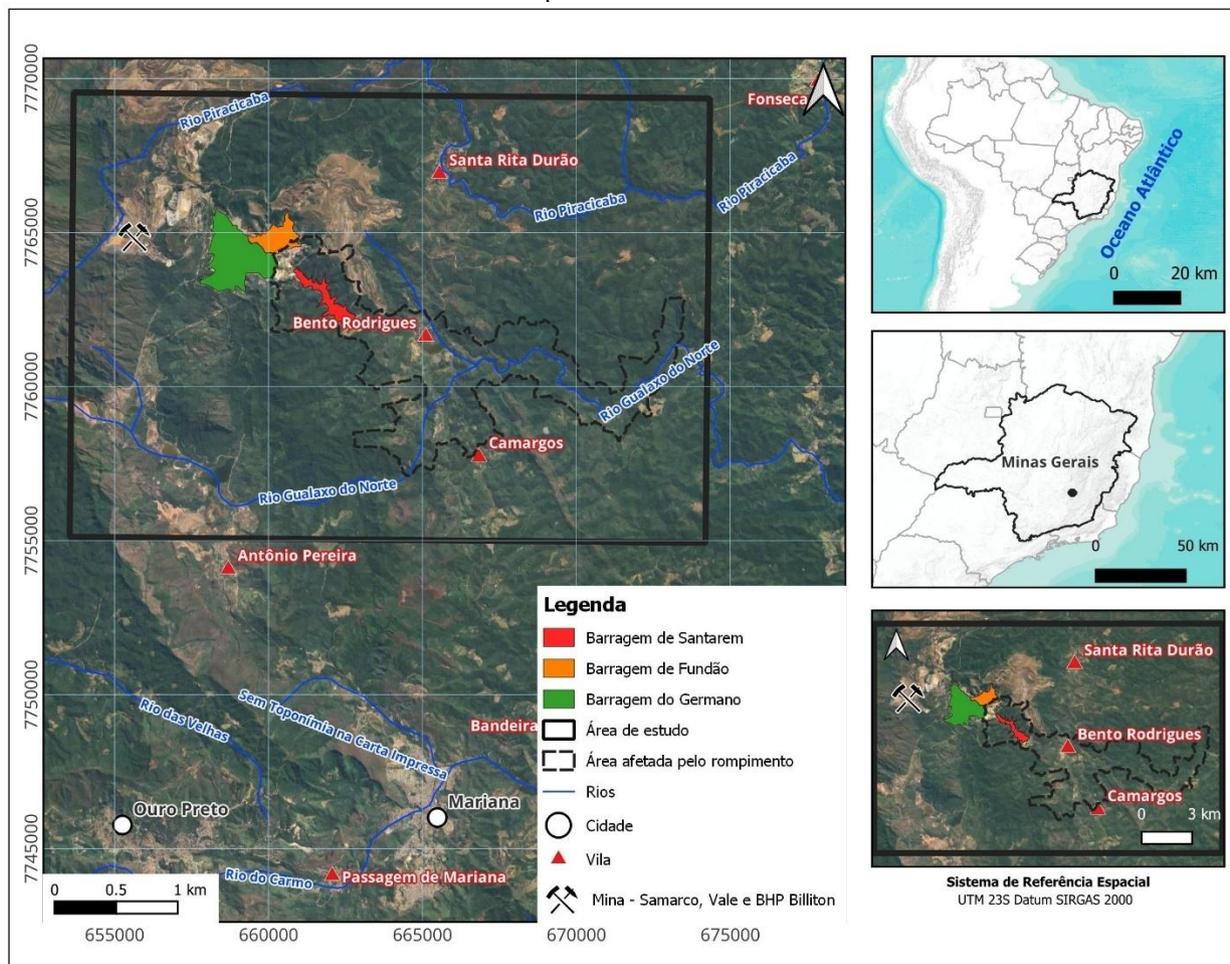
2. Material e Métodos

2.1 Área de Estudo

A Mina de Fábrica Nova, operada pelas empresas Samarco, Vale e BHP Billiton, é um depósito de minério de ferro composto predominantemente pelos minerais hematita (Fe_2O_3), magnetita (Fe_3O_4) e goethita (FeO-OH). A área analisada ao redor da mina abrange parte do rio Gualaxo do Norte e as barragens de rejeitos Germano, Santarém e Fundão, localizadas no Complexo Minerário de Germano, ao norte dos municípios de Ouro Preto e Mariana (Figura 1). Os rios da região integram a Bacia Hidrográfica do rio Doce.

Figura 1 – Mapa da área de estudo com localização das barragens de rejeitos de Santarém, de Fundão e do Germano controladas pelas empresas Samarco, Vale e BHP Billiton. O polígono de influência atingido pela lama de rejeito engloba rio Santarém e parte do rio Gualaxo do Norte.

Figure 1 - Map of the study area showing the location of the Santarém, Fundão and Germano tailings dams controlled by the companies Samarco, Vale and BHP Billiton. The area of influence affected by the tailings mud includes the Santarém River and part of the Gualaxo do Norte River.



Fonte: Autores (2024)
Source: Authors (2024)

Foi considerada uma área de aproximadamente 16,2 km² afetada pelo rompimento da barragem, coberta pela lama de rejeitos (IDE ULFA, 2024; Figura 1), para a detecção e dispersão de minerais ferrosos.

2.2 Aquisição e processamento das imagens

Imagens Landsat 8 (órbita/ponto 217/74) com sensores *Operational Land Imager* (OLI) e *Thermal Infrared Sensor* (TIRS) foram adquiridas gratuitamente no website *Earth Explorer* (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) do *United States Geological Survey* (USGS). Foram selecionadas cenas do Landsat 8 dos dias 24 de maio de 2015 (antes do rompimento da barragem), 12 de novembro de 2015 (poucos dias após o rompimento) e 19 de agosto de 2022.

As imagens apresentam resolução espacial de 30 x 30 m por pixel para as bandas do visível, infravermelho próximo e infravermelho de ondas curtas; 100 x 100 m por pixel para a banda de infravermelho termal; e 15 x 15 m por pixel para a banda pancromática (Tabela 1). Em cada pixel do sensor Landsat 8/OLI, os valores de reflectância são registrados como números digitais (NDs) em uma escala de 12 bits, correspondendo a 4.096 níveis.

A transformação de ND em valor de refletância foi realizada pelo *plugin Semi-Automatic Classification* (Congedo, 2021), modulo instalado no QGIS Desktop 3.28.0.

Tabela 1 - Faixa de comprimento de onda e resolução espacial do Landsat 8 OLI e TIRS.
Table 1 - Wavelength range and spatial resolution of the Landsat 8 OLI and TIRS.

Satélite/Sensor	Subsistema	Bandas	Comprimento de onda (µm)	Resolução Espacial
Landsat-8/OLI	*VNIR	Faixa 1 - Aerossol costeiro	0,43 - 0,45	30m
		Banda 2 – Visível Azul	0,45 - 0,51	30m
		Banda 3 - Visível Verde	0,53 - 0,59	30m
		Banda 4 - Visível Vermelho	0,64 - 0,67	30m
		Banda 5 - Infravermelho Próximo - <i>Near Infrared</i> (NIR)	0,85 - 0,87	30m
	SWIR	Banda 6 - Infravermelho de ondas curtas - <i>Shortwave Infrared</i> (SWIR) 1	1,56 - 1,65	30m
		Banda 7 - Infravermelho de ondas curtas (SWIR) 2	2,11 – 2,29	30m
		Banda 8 - Pancromática	0,50 - 0,68	15m
		Banda 9 - Cirro	1,36 – 1,38	30m
TIRS		Banda 10 - Infravermelho Térmico (TIRS) 1	10,60 – 11,19	100m
		Banda 11 - Infravermelho Térmico (TIRS) 2	11,50 – 12,51	100m

* VNIR = *visible to near-infrared*

Fonte: Earth Explore, 2024.
Source: Earth Explore, 2024

A conversão de ND para reflectância é de acordo com a fórmula abaixo (Equação 1).

$$\rho\lambda = Mp * Qcal + Ap \quad (1)$$

Onde: $\rho\lambda$ = Reflectância Planetária, Mp = Fator de reescalonamento multiplicativo específico da banda dos metadados do Landsat, $Qcal$ = Valores de pixel de produto padrão quantizados e calibrados (DN), Ap = Fator de redimensionamento aditivo específico da banda dos metadados do Landsat,

Após a conversão de ND para reflectância, a correção do ângulo solar foi realizada com base na equação 2 proposta pelo USGS, expressa da seguinte forma:

$$\rho\lambda = \frac{\rho\lambda'}{\text{sen}\theta} \quad (2)$$

Onde: $\rho\lambda'$ = é a reflectância no topo da atmosfera (adimensional), $\text{sen}\theta$ = ângulo de elevação solar (SUN_ELEVATION do metadado).

A correção atmosférica foi realizada utilizando o *plugin Semi-Automatic Classification*, aplicando-se o método de Subtração de Objeto Escuro 1 (*Dark Object Subtraction 1 – DOS1*), conforme proposto por Chavez (1996). O procedimento seguiu a equação abaixo (Equação 3).

$$L_{\text{min}} = Ml * ND_{\text{min}} \quad (3)$$

Onde: L_{min} = a radiância espectral mínima, Ml = Fator de redimensionamento multiplicativo específico da banda dos metadados do Landsat, ND_{min} = número digital correspondente a L_{min} , AL = Fator de redimensionamento aditivo específico da banda dos metadados do Landsat.

2.3 Caracterização espectral dos minerais ferrosos

Espectros de reflectância para minerais de ferro em rochas, solos e regolitos abrange ampla faixa do comprimento de onda do espectro eletromagnético de 0,40 a 1,20 μm (Townsend, 1987).

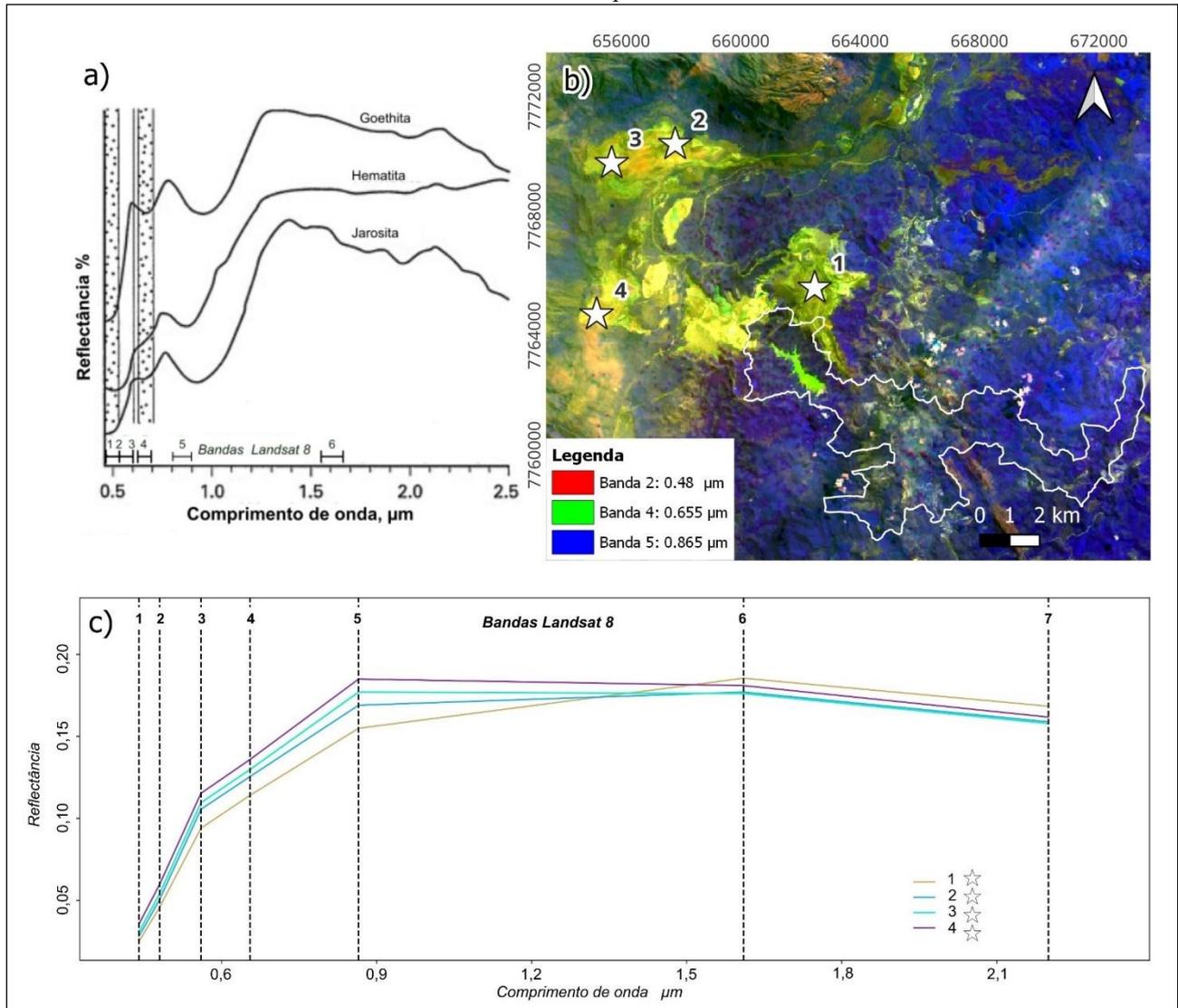
A goethita, hematita e a magnetita, minerais pertencentes às classes dos hidróxidos e óxidos de ferro, apresentam absorções características associadas ao campo cristalino. Essas absorções ocorrem nas faixas espectrais de 0,63–0,71 μm e 0,85–1,00 μm , respectivamente, como resultado de processos eletrônicos, incluindo absorções de campo cristalino e transferência de carga (Hunt, 1977; Hunt e Ashley, 1979; Singer, 1981).

Segundo Hunt e Ashley (1979), a abundância de (hidro) óxidos de ferro está associada à profundidade da absorção gerada pelo campo cristalino entre 0,85 e 1,00 μm . No entanto, o tamanho e a forma das partículas e as propriedades físico-químicas exercem uma influência na absorção espectral (Hunt et al., 1971)

Ferro ferroso (Fe^{2+}) produz absorções eletrônicas centradas em cerca de 0,45 μm , 1,0 - 1,1 μm , 1,8 - 1,9 μm e 2,2 -2,3 μm , dependendo da sua rede cristalina (El Zalaky et al., 2018). Ainda segundo os autores, ferro férrico (Fe^{3+}) produz absorções em comprimentos de onda entre 0,65 μm e 0,87 μm . A Figura 2A mostra os espectros dos minerais de ferro que têm baixa refletância nas bandas 1, 2 e 5 e alta refletância na banda 4 no Landsat-8.

Figura 2 – a) Curvas de refletância espectral para minerais de ferro goethita, hematita e jarosita no Landsat 8, mostrando baixa refletância nas bandas 1, 2, e 5 devido ao efeito de transferência de carga. Modificado de Hunt e Ashley, (1979) e Sabins, (1999). b) Composição de cores RGB com bandas 2, 4 e 5 do Landsat-8, mostrando a posição dos pixels das cavas de minério de ferro 1, 2, 3 e 4 da Mina da Fábrica Nova, pertencente as empresas Samarco, Vale e BHP Billiton, pré rompimento. c) Assinatura espectral das cavas de minério de ferro, caracterizada por alta refletância na banda 6 e valores menores nas bandas 1, 2, 3, 4 e 5, com estas últimas destacando-se por sua relevância na absorção de minerais ferrosos pré rompimento.

Figure 2 – a) Spectral reflectance curves for iron minerals goethite, hematite, and jarosite in Landsat 8, showing low reflectance in bands 1, 2, and 5 due to the charge transfer effect. Modified from Hunt and Ashley, (1979) and Sabins, (1999). b) RGB color composite with bands 2, 4, and 5 from Landsat-8, showing the pixel positions of iron ore pits 1, 2, 3, and 4 of the Fábrica Nova Mine, owned by Samarco, Vale, and BHP Billiton. c) Spectral signature of the iron ore pits, characterized by high reflectance in band 6 and lower values in bands 1, 2, 3, 4, and 5, with the latter standing out for their relevance in the absorption of ferrous minerals.



Fonte: Autores (2024)
Source: Authors (2024)

Na área de estudo, a caracterização espectral dos minerais de ferro foi realizada comparando a assinatura espectral das cavas de minério, extraído da composição de cores RGB das bandas 2, 4 e 5 do Landsat-8 (Figuras 2B e 2C), com as curvas de reflectância espectral dos minerais de ferro dos trabalhos de Hunt e Ashley, 1979 e Sabins, 1999.

2.4 Cálculo *Index Ferric Oxides* (IFO)

Para avaliar a concentração de minerais ferrosos, para cada pixel da imagem na área de influência atingida pela lama, foi feito o cálculo *Index Ferric Oxides* (IFO) de índices espectrais *Index Data Base* (HENRICH, 2024), utilizando a banda do infravermelho de ondas curtas (B6) e a banda do infravermelho próximo (B5), como mostra a equação abaixo (Equação 4).

$$\text{IFO: (SWIR 1) / NIR (4)}$$

Onde: NIR = Reflectância na banda do infravermelho próximo, SWIR 1 = Reflectância na banda do infravermelho de ondas curtas 1.

3. Resultados

3.1 *Análise e comparação de assinaturas espectrais*

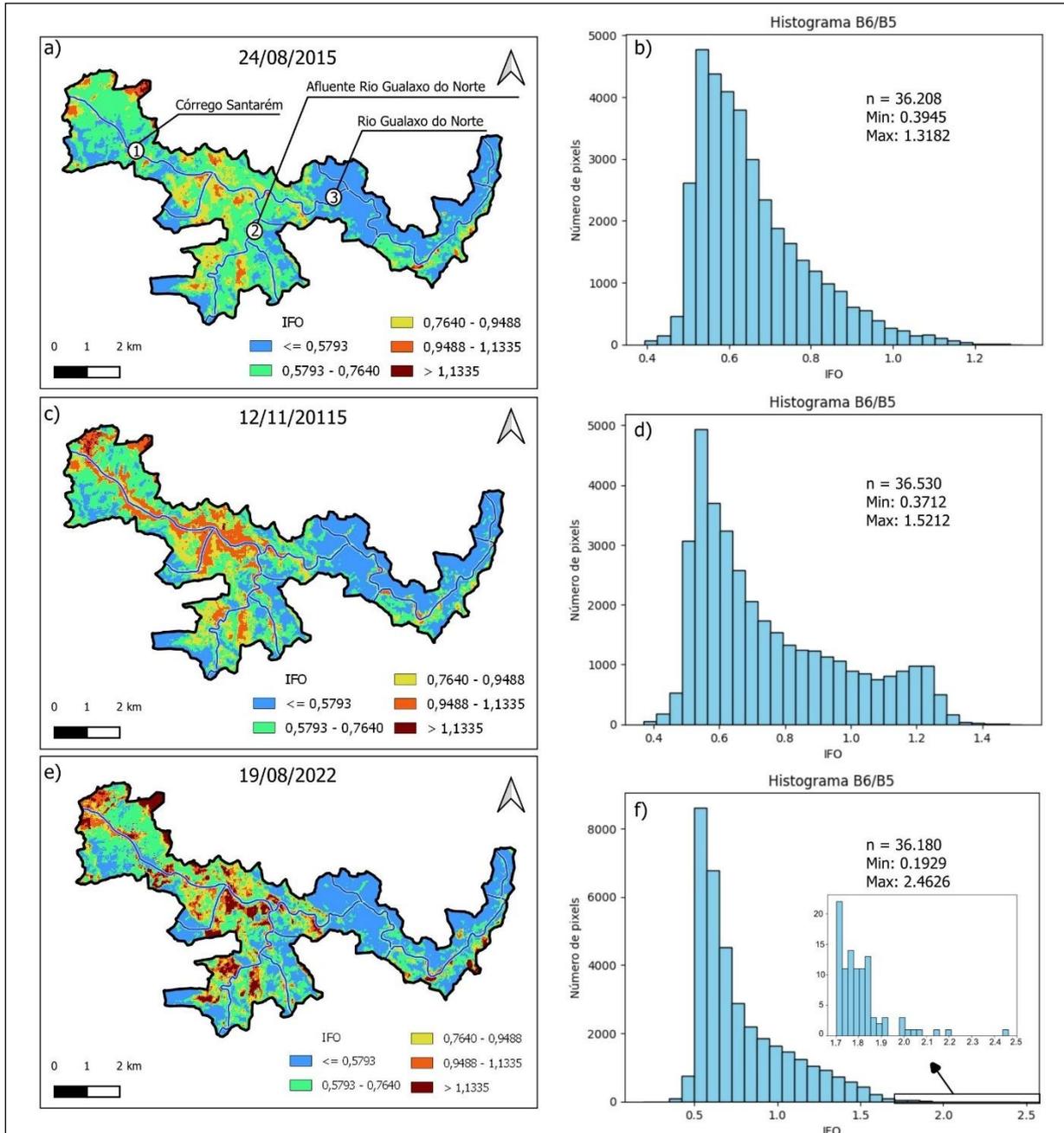
A Figura 3 apresenta mapas de reflectância com cinco faixas de comprimento de onda para os valores do IFO na área impactada pelo rompimento, além de histogramas que mostram a distribuição de pixels por classe do IFO. De modo geral, observa-se uma variação nas tonalidades e intervalos de comprimento de onda para diferentes tipos de alvos através das imagens do Landsat 8/OLI.

Ao comparar os valores de reflectância nas imagens de 24/08/2015, 12/11/2015 e 19/08/2022, observa-se que no cenário de 24/08/2015 há uma predominância de reflectância nos comprimentos de onda abaixo de 0,5793 μm e no intervalo de 0,5793 - 0,7640 μm (Figura 3A-B). Pequenas áreas dispersas exibem reflectância nas faixas de 0,7640 a 0,9488 μm e de 0,9488 a 1,1335 μm , totalizando uma área de aproximadamente 6,25 km^2 (Tabela 2). Vale destacar que essas áreas dispersas não estão localizadas ao longo do trecho impactado pela lama de rejeito, indicando uma superfície possivelmente rica em óxidos e hidróxidos de ferro, o que é coerente com a característica geológica da região, conhecida por seus depósitos abundantes de minerais de ferro (Baltazar e Raposo, 1993).

O histograma apresentado na Figura 3B revela uma concentração superior a 1500 pixels na faixa de 0,5793 a 0,7640 μm , com um pico centralizado entre 0,55 e 0,57 μm . Esse comprimento de onda predominante coincide com as áreas de vegetação da localidade, conforme ilustrado na Figura 4C. As faixas espectrais predominantes abrangem aproximadamente 27,18 km^2 da área analisada, correspondendo a cerca de 81% do total (Tabela 2). Esses resultados sugerem a ausência de evidências que indiquem a concentração de minerais de ferro ao longo do trecho impactado pela lama de rejeito.

Figura 3 – Imagens *raster* da razão B6/B5 dos dias 24/08/2015, 12/11/2015 e 19/08/2022, apresentando os valores de IFO e os respectivos histogramas de frequência, que indicam a distribuição do número de pixels por valor de IFO. Interpolação por método discreto no QGIS.

Figure 3 - Raster images of the B6/B5 ratio from 08/24/2015, 11/12/2015 and 08/19/2022, showing the IFO values and the respective frequency histograms, which indicate the distribution of the number of pixels per IFO value. Interpolation by discrete method in QGIS.



Fonte: Autores (2024)
Source: Authors (2024)

Tabela 2 – Faixas com valores de IFO que abrangem a área de influência para as imagens registradas em 24/08/2015, 12/11/2015 e 19/08/2022.

Table 2 - Bands with IFO values that cover the area of influence for images recorded on 08/24/2015, 11/12/2015 and 08/19/2022.

Faixa	Valores IFO	24/08/2015		12/11/2015		19/08/2022	
		Área de cobertura (km ²)	Área de cobertura (%)	Área de cobertura (km ²)	Área de cobertura (%)	Área de cobertura (km ²)	Área de cobertura (%)
1	0 - 0,5793	11,62	34,63	9,73	29,01	9,82	29,27
2	0,5793 - 0,7640	15,56	46,37	11,07	33,00	11,26	33,55
3	0,7640 - 0,9488	5,09	15,18	5,56	16,56	4,76	14,20
4	0,9488 - 1,1335	1,16	3,47	3,82	11,39	3,34	9,94
5	> 1,1335	0,12	0,35	3,37	10,04	4,37	13,04
Total		33,55	100,00	33,55	100,00	33,55	100,00

Fonte: Autores (2024)
Source: Authors (2024)

Na imagem de 12/11/2015, observa-se um aumento expressivo na faixa de comprimento de onda entre 0,9488 e 1,1335 μm (Figura 3C), evidenciado pela distribuição de valores no histograma de frequência (Figura 3D), que mostra mais de 1000 pixels no intervalo. Nota-se que, ao longo do Córrego Santarém e no afluente do rio Gualaxo do Norte, predomina o comprimento de onda entre 0,9488 e 1,1335 μm (Figura 3C). No entanto, ao longo do rio Gualaxo do Norte, na porção leste, a faixa predominante é $\leq 0,5793 \mu\text{m}$, similar à observada na imagem de 24/08/2015. Destaca-se que, nessa região, o rio Gualaxo do Norte apresenta um leito mais encaixado (Figura 5F), o que justifica a menor representatividade das faixas de maior comprimento de onda. Além disso, ao longo do Córrego Santarém, é possível observar a presença de barragens (Figuras 5G e 5H) que foram impactadas pela lama de rejeito.

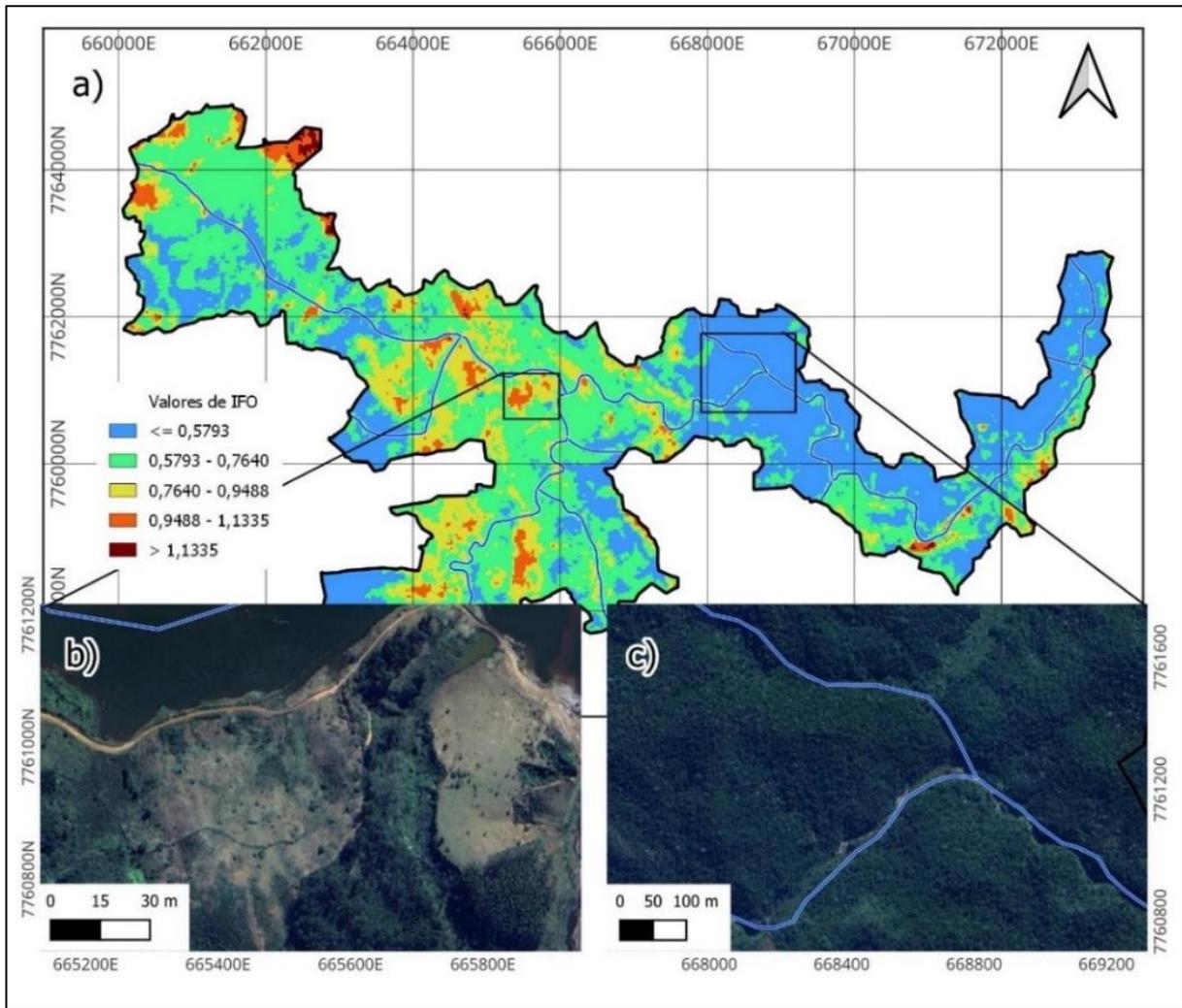
Esse impacto resultou no acúmulo de resíduos de ferro, evidenciado nas faixas de maior comprimento de onda. De forma geral, os dados indicam o predomínio da faixa espectral associada à goethita (0,9488 e 1,1335 μm), corroborando que o trecho do Córrego Santarém e o início do rio Gualaxo do Norte foram impactados pela lama de rejeito após o rompimento da barragem. Conforme mostrado na Figura 3C e Tabela 2, as faixas espectrais de maiores comprimentos afetaram uma área aproximada de 7,19 km^2 .

Para imagem do dia 19/08/2022 observa-se a faixa predominante em $\leq 0,5793 \mu\text{m}$ seguindo dos comprimentos de onda de 0,5793 e 0,7640 μm e 0,7640 e 0,9488 μm (Figura 3E). Essas faixas exibem concentração acima de 2000 pixels (Figura 3F), totalizando uma área afetada em cerca de 25,84 km^2 (Tabela 2). De forma similar com dados das imagens dos dias 24/08/2015 e 12/11/2015 a faixa em $\leq 0,5793 \mu\text{m}$ demonstra ser área coberta pela vegetação.

As faixas de maior comprimento de onda (0,9488 a 1,1335 μm e $\geq 1,1335 \mu\text{m}$) aparecem de forma dispersa e localizada, totalizando uma área de 7,71 km^2 , o que corresponde a cerca de 23% da área analisada (Tabela 2).

Figura 4 – Os valores de IFO da imagem de 24/08/2015 (a) destacam uma área com predominância de comprimentos de onda entre 0,7640 e 1,1335 μm , indicando uma superfície possivelmente rica em óxidos e hidróxidos de ferro (b). A área com valores de reflectância $\leq 0,5793 \mu\text{m}$ coincide com regiões de vegetação (c).

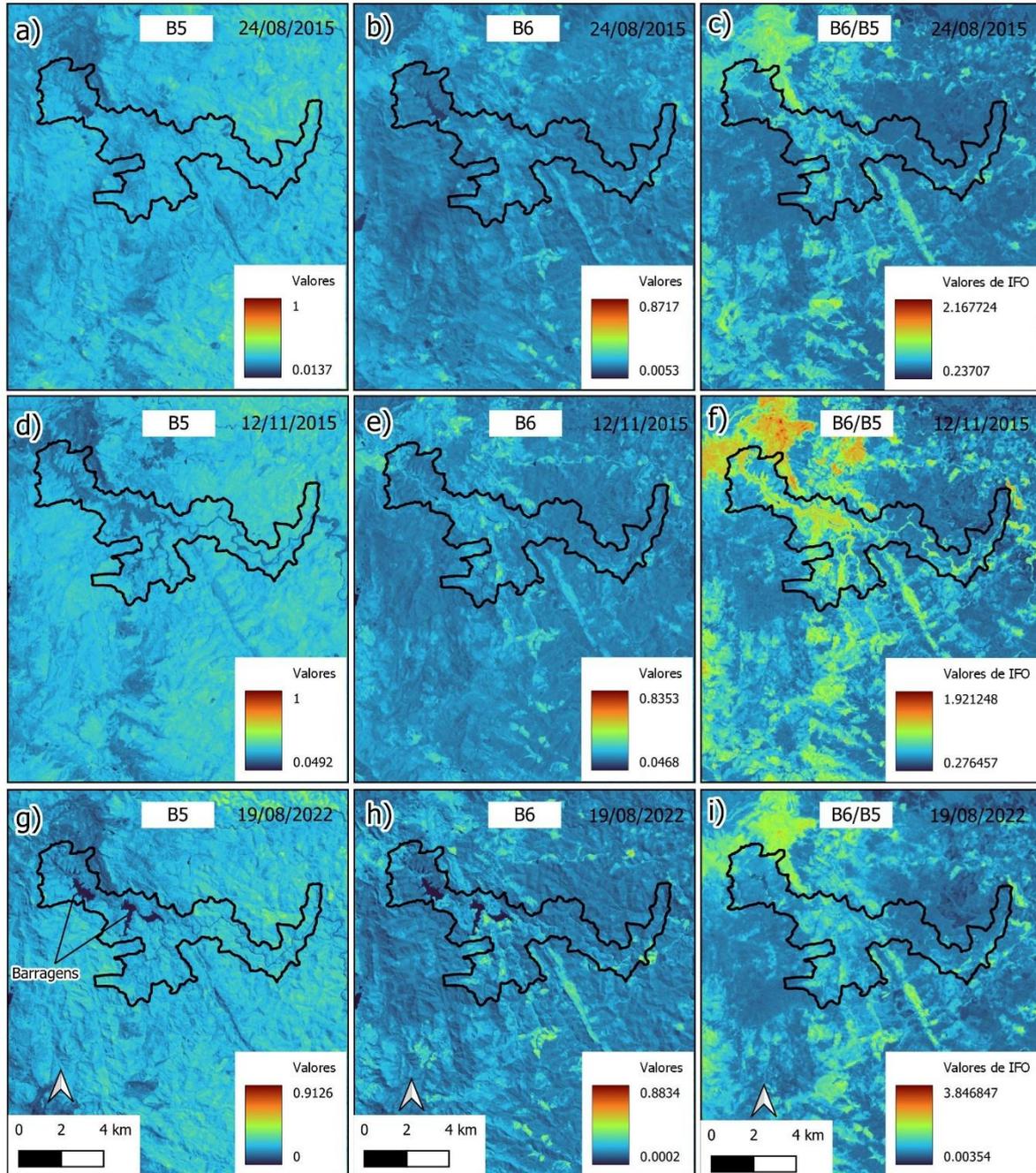
Figure 4- The IFO values of the image from 08/24/2015 (a) highlight an area with a predominance of wavelengths between 0.7640 and 1.1335 μm , indicating a surface possibly rich in iron oxides and hydroxides (b). The area with reflectance values $\leq 0.5793 \mu\text{m}$ coincides with regions of vegetation (c).



Fonte: Autores (2024)
Source: Authors (2024)

Figura 5 – Imagens Landsat OLI mostrando a área de influência extrapolada, utilizando as bandas do infravermelho próximo (B5), do infravermelho de ondas curtas (B6) e a razão B6/B5, referentes aos dias 24/08/2015, 12/11/2015 e 19/08/2022. Interpolação por método linear no QGIS.

Figure 5 - Landsat OLI images showing the extrapolated area of influence, using the near infrared (B5) and shortwave infrared (B6) bands and the B6/B5 ratio, for 24/08/2015, 12/11/2015 and 19/08/2022. Interpolation by linear method in QGIS.



Fonte: Autores (2024)
Source: Authors (2024)

A distribuição das áreas cobertas pelas faixas de 0,9488 a 1,1335 μm e $\geq 1,1335 \mu\text{m}$ é semelhante à observada na imagem de 12/11/2015, conforme apresentado na Tabela 2. Vale destacar que os dados de reflectância da imagem capturada em 19/08/2022 atingem valores de até 2,4626 μm , apresentando baixa densidade de pixels. Esse padrão resulta em um deslocamento dos dados do histograma para a direita (Figura 3F). Além disso, a área coberta por comprimentos de onda $\geq 1,1335 \mu\text{m}$ totaliza aproximadamente 4,37 km^2 (Tabela 2).

4. Discussão

As bandas do sensor OLI do satélite Landsat 8 são úteis para a detecção de grupos de minerais relevantes, especialmente aqueles associados a óxidos e hidróxidos de ferro, devido à sua resposta no infravermelho próximo. Esses minerais apresentam características espectrais em comprimentos de onda entre 0,4 e 2,5 μm . Anomalias de absorção em torno de 0,9 μm geralmente indicam a presença de hematita pura (Ducart et al., 2016; El Zalaky et al., 2018), enquanto anomalias em comprimentos de onda superiores a 0,96 μm sugerem uma maior abundância de goethita (Hunt e Ashley, 1979; Ducart et al., 2016; El Zalaky et al., 2018). A forte absorção característica da hematita e da goethita ocorre devido à transição de carga resultante da oxidação, conforme descrito por Clark et al. (1999). É importante destacar que o comportamento de reflectância de alguns óxidos e hidróxidos de ferro pode variar devido a diversos fatores, como a variação no tamanho das partículas, que provoca efeitos espectrais transopacos em diferentes partes do espectro, e a forma dessas partículas (Salisbury e Hunt, 1968; Cudahy e Ramanaidou, 1997; Ramanaidou et al., 2008).

Para detectar áreas afetadas pela lama de rejeito rica em minerais ferrosos, proveniente do rompimento da barragem de Fundão, aplicou-se o Índice de Minerais Ferrosos, definido pela razão entre as bandas B6/B5 do Landsat 8/OLI. As imagens raster geradas, apresentadas nas figuras 3 e 5, abrangem um amplo espectro de comprimentos de onda. No entanto, a faixa mais relevante para a detecção de óxidos e hidróxidos de ferro situa-se acima de 0,90 μm , com destaque para a faixa espectral entre 0,9488 e 1,1335 μm , compatível com os espectros de referência de hematita e goethita descritos por Townsend (1987) e Kokaly et al. (2017), ambos obtidos por meio de difração de raios X.

Na imagem de 24/08/2015 (Figura 3A), identificam-se pequenas áreas com comprimento de onda acima de 0,9488 μm fora dos cursos d'água impactados pela lama de rejeito, sugerindo regiões de solo exposto com presença de minerais ferrosos, em consonância com o contexto geológico da área, rica em rochas itabiríticas (~52% Fe). A Figura 4A-B apresenta um recorte da paisagem na imagem do dia 24/08/2015, evidenciando a exposição da superfície na faixa espectral entre 0,9488 e 1,1335 μm , indicando anomalias associadas à presença de minerais de ferro. Adicionalmente, em uma escala mais ampla, a Figura 5C revela áreas com anomalias para minerais ferrosos (representadas em verde, ~0,9 μm), extrapolando os limites do polígono de influência da área estudada.

A faixa espectral de 0,9488 e 1,1335 μm para imagem do dia 12/11/2015 fica em evidência ao longo da margem e planícies de inundação do córrego Santarém, evidenciando o acúmulo de minerais ferrosos decorrente do rompimento da barragem. Segundo Araujo et al., (2017), resíduos que sobram do processo de beneficiamento dos minérios itabiríticos são muito finos, da ordem de 200 mesh (ou 0,074 mm). Ainda segundo os autores, a grande maioria os resíduos da lama de rejeito compreendem sílica (SiO_2), hematita, magnetita, goethita e caulinita [$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$]. Townsend (1987) mostrou que partículas de hematita menor que 0,125 mm tendem a apresentar um aumento nos valores do espectro da reflectância, com pico em torno de 0,855 μm . Quanto menor a partícula maior será a reflectância. As Figuras 3C e 5F evidenciam a predominância de comprimentos de onda superiores a 0,90 μm , indicando o acúmulo de minerais ferrosos ao longo do trecho atingido pelo rompimento da Barragem de Fundão.

Anos após o rompimento da barragem, a faixa espectral entre 0,9488 e 1,1335 μm ocorre em uma área 3 vezes maior em comparação à imagem de 12/11/2015 (Tabela 2). Esse resultado indica que houve um

aumento da concentração de óxidos e hidróxidos de ferro em relação àqueles que ocorriam naturalmente na região, especialmente goethita e hematita. O acúmulo desses minerais está diretamente associado à sua liberação no curso fluvial após o rompimento da barragem. Observa-se ainda um aumento na área coberta pelo comprimento de onda de 1,1335 μm (Figura 3E e Tabela 2). Comprimentos de onda em torno de 1,4 μm podem ser atribuídos à presença de combinações de OH-Al-Mg, características da formação de argilominerais, micas e anfibólios (Hunt, 1977; Hunt e Ashley, 1979; Crowley e Vergo, 1988; Clark et al., 1990). Brindley et al. (1986) apresentaram uma análise mais detalhada sobre as atribuições das bandas de absorção de OH na caulinita. A presença desse mineral na lama de rejeito pode estar associada ao aumento dos valores acima de 1,1335 μm . Levando em consideração a resposta aos dados do espectro infravermelho na área, infere-se que, anos após o rompimento, os resíduos ainda permanecem na região afetada, evidenciando um aumento da concentração de minerais ferrosos e um aumento relativo na presença de argilominerais, como caulinita.

5. Conclusão

A análise espectral das imagens Landsat 8/OLI demonstrou sua eficácia na identificação de minerais de ferro e no mapeamento de áreas impactadas por rejeitos de mineração. As variações nas faixas de comprimento de onda ao longo dos períodos analisados refletem alterações na cobertura do solo e na dispersão de óxidos e hidróxidos de ferro.

Os resultados evidenciam que comprimentos de onda mais curtos ($\leq 0,5793 \mu\text{m}$) estão predominantemente associados a áreas de vegetação, cobrindo cerca de 81% da área analisada em 2015 e mantendo essa tendência em 2022. Por outro lado, faixas de maior comprimento de onda (0,9488 a 1,1335 μm) indicaram concentrações significativas de minerais de goethita nas áreas impactadas, especialmente ao longo do Córrego Santarém e no início do rio Gualaxo do Norte, atingindo até 7 km^2 em 2015.

Os dados mais recentes, de 2022, apontam a presença de minerais ferrosos em uma área 3 vezes maior em relação àquela de 2015, atribuída ao aporte da lama de rejeito após o rompimento da barragem. A distribuição dispersa de faixas espectrais associadas a minerais de ferro totalizou cerca de 23% da área analisada. Este padrão reforça o impacto contínuo da lama de rejeitos sobre a região e a utilidade dos índices espectrais no monitoramento ambiental, auxiliando na identificação de mudanças na paisagem e na composição mineralógica ao longo do tempo.

Essas observações destacam o papel crítico da tecnologia de sensoriamento remoto no gerenciamento ambiental e na mitigação de impactos causados por desastres de mineração.

6. Agradecimentos

Os autores agradecem aos revisores pelas sugestões construtivas, que contribuíram significativamente para a melhoria do manuscrito. Também expressam sua gratidão ao Prof. Dr. Alex Joaquim Choupina Andrade Silva e ao Prof. Me. Leonardo Azevedo Sá Alkmin pelo apoio na revisão e aprimoramento do texto.

7. Referências

Abrams, M., Rothery, D., & Pontual, A. (1988). Mapping in the Oman ophiolite using enhanced Landsat Thematic Mapper images: **Tectonophysics**, v, 151, no, 1- 4, p, 387-401.

Araujo, N. E. S., de Oliveira, D. S., de Camargo, P. B., Junior, J. F., Winck, H. V., de Moraes Tavares, M., & de Moraes, W. A. (2017). **AMOSTRAGEM E ESTUDO DE SEDIMENTOS FLUVIAIS NA REGIÃO DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DA SAMARCO**. In: 18º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, SãoPaulo, SP

Arisanty, D., Saputra, A. N., Rahman, A. M., Hastuti, K. P., & Rosadi, D. (2021). The Estimation of Iron Oxide Content in Soil based on Landsat 8 OLI TIRS Imagery in Wetland Areas. **Pertanika Journal of Science & Technology**, 29(4).

Barros, E. de O., & Pamboukian, S. V. D. (2017). ANÁLISE DO DESASTRE DE MARIANA ATRAVÉS DA CLASSIFICAÇÃO SUPERVISIONADA DE IMAGENS DE SENSORIAMENTO REMOTO. **Revista Mackenzie de Engenharia e Computação**, 17(1).

Baltazar, O. F., & Raposo, F. O., (Orgs.) (1993). Mariana: folha SF.23-X-B-I: estado de Minas Gerais. Brasília: DNPM; CPRM, 196 p. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil - PLGB.

Brindley, G. W., Kao, C. C., Harrison, J. L., Lipsicas, M., & Raythatha, R. (1986). Relation between structural disorder and other characteristics of kaolinites and dickites. **Clays and Clay Minerals**, 34(3), 239-249.

Chavez, P. S. (1996). Image-based atmospheric corrections-revisited and improved, **Photogrammetric engineering and remote sensing**, v, 62, n, 9, p, 1025-1035, 1996.

Clark, R. N., King, T. V., Klejwa, M., Swayze, G. A., & Vergo, N. (1990). High spectral resolution reflectance spectroscopy of minerals. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, 95(B8), 12653-12680.

Clark, R.N. (1999). **Chapter 1: Spectroscopy of Rocks and Minerals, and Principles of Spectroscopy**. In: A.N. Rencz, (Ed.), Manual of Remote Sensing, Vol.3, Remote Sensing for the Earth Sciences. John Wiley and Sons, New York, pp.3-58

Ciampalini, A., Garfagnoli, F., Antonielli, B., Moretti, S., & Righini, G. (2013). Remote sensing techniques using Landsat ETM+ applied to the detection of iron ore deposits in Western Africa. **Arabian Journal of Geosciences**, 6, 4529-4546.

Congedo, L. (2021). Semi-Automatic Classification Plugin: A Python tool for the download and processing of remote sensing images in QGIS. **Journal of Open Source Software**, 6(64), 3172.

Crepani, E., Medeiros, J. D., Hernandez Filho, P., Florenzano, T. G., Duarte, V., & Barbosa, C. C. F. (2001). **Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao zoneamento ecológico-econômico e ao ordenamento territorial** (p. 124). São José dos Campos: Inpe.

Crowley, J. K., & Vergo, N. (1988). Near-infrared reflectance spectra of mixtures of kaolin-group minerals: use in clay mineral studies. **Clays and Clay Minerals**, 36(4), 310-316.

Cudahy, T.J., & Ramanaidou, E.R. (1997). Measurement of the hematite: goethite ratio using field visible and near-infrared reflectance spectrometry in channel iron deposits, western Australia. **Australian Journal of Earth Sciences** 44 (4), 411–420.

Dogan, H. M. (2008). Applications of remote sensing and Geographic Information Systems to assess ferrous minerals and iron oxide of Tokat province in Turkey. **International Journal of Remote Sensing**, 29(1), 221-233.

Ducart, D. F., Silva, A. M., Toledo, C. L. B., & Assis, L. M. D. (2016). Mapping iron oxides with Landsat-8/OLI and EO-1/Hyperion imagery from the Serra Norte iron deposits in the Carajás Mineral Province, Brazil. **Brazilian Journal of Geology**, 46, 331-349.

U.S. Geological Survey. (2019). **Earth Explorer-Home**. Satellite Data. Disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov>. Acesso em: 10/04/ 2024.

El Zalaky, M, A.; Essam, M, E.; El Arefy, R, A, (2018), Assessment of band ratios and feature-oriented principal component selection (FPCS) techniques for iron oxides mapping with relation to radioactivity using landsat 8 at Bahariya Oasis, **Egypt, Researcher**, 10(10),

Farias, M. O., Candeias, A. L. B., Oliveira, L. M. M., Almeida, D. N. O., & Tavares Júnior, J. R. (2017). Variabilidade espaço-temporal da cobertura do solo por índices de vegetação e água no Agreste Pernambucano. **Revista Brasileira de Agrotecnologia**, 7(3), 91-99.

Florenzano, T. G. (2007). **Iniciação em sensoriamento remoto**. Oficina de textos.

Freire, N. C. F., da Penha Pacheco, A., & Queiroz, V. D. L. B. (2021). Uma abordagem metodológica de Sensoriamento Remoto para o monitoramento da contaminação do rio Paraopeba pós-desastre de Brumadinho-MG. **Ciência e Natura**, 43, e36-e36.

Haylemikeal, H. A., Legesse, D., Suryabhadgavan, K. V., & Atnafu, B. (2024). Mapping of ferric (Fe³⁺) and ferrous (Fe²⁺) iron oxides distribution using ASTER and Landsat 8 OLI data, in Negash Lateritic iron deposit, Northern Ethiopia. **Geology, Ecology, and Landscapes**, 8(3), 223-240.,

Henrich, V. (2024). **Index Database**, Disponível em: https://www.indexdatabase.de/db/is.php?sensor_id=168. Acesso em: 18/04/2024.

Hunt, G. R. (1977). Spectral signatures of particulate minerals in the visible and near infrared. **Geophysics**, 42(3), 501-513.

Hunt, G. R., & Ashley, R. P. (1979). Spectra of altered rocks in the visible and near infrared. **Economic Geology**, 74(7), 1613-1629.

Hunt, G. R. (1980). Electromagnetic radiation: The communication link in remote sensing. **Remote sensing in geology**, 5-45.,

IDE UFLA. (2024). Disponível em: http://ide.vale.ufla.br/layers/geonode:sisema_barragem_fundao_mariana_area_afetada, Acesso em: 20/10/2024,

Kokaly, R.F., Clark, R.N., Swayze, G.A., Livo, K.E., Hoefen, T.M., Pearson, N.C., Wise, R.A., Benzel, W.M., Lowers, H.A., Driscoll, R.L., & Klein, A.J. (2017). **USGS Spectral Library Version 7**: U.S. Geological Survey Data Series 1035, 61 p

Lucchetta, B. C., & Oliveira, F. S. (2021). **Uso de imagens do OLI/Landsat 8 no estudo de desastres ambientais: estudo de caso do rompimento da barragem em Brumadinho–MG**. Monografia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente (SP), Brasil.

Mesquita, P., Carvalho, P. D., & Ogando, L. D. Desenvolvimento e inovação em mineração e metais. 2016. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, (43).

Morris, R. V., Lauer Jr, H. V., Lawson, C. A., Gibson Jr, E. K., Nace, G. A., & Stewart, C. (1985). Spectral and other physicochemical properties of submicron powders of hematite (α - Fe_2O_3), maghemite (γ - Fe_2O_3), magnetite (Fe_3O_4), goethite (α - FeOOH), and lepidocrocite (γ - FeOOH). **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, 90(B4), 3126-3144.

Odunuga, S., OshoBadru, O. E. G. S., & Raji, S. A. (2023). Prospecting and Mapping Iron Ore within the Niger–Benue Confluence Using Landsat 8. **Journal of the Indian Society of Remote Sensing**, 51(7), 1523-1539.

Ortiz, J. L., & Freitas, M. I. C. D. (2005). Mapeamento do uso da terra, vegetação e impactos ambientais por meio de sensoriamento remoto e geoprocessamento. **Geociências**, 24(1), 91-104

Pires, F. H., da Cunha, C. F., & Peres, G. S. (2023). Detecção e delimitação das áreas afetadas pelo rompimento da barragem em Brumadinho–MG. **Holos Environment**, 23(1), 58-71.

Pons, N. A. D., Pejon, O. J., & Zuquette, L. V. (2007). Use of geoprocessing in the study of land degradation in urban environments: the case of the city of São Carlos, state of São Paulo, Brazil. **Environmental Geology**, 53, 727-739.

Rajendran, S., Thirunavukkarasu, A., Balamurugan, G., & Shankar, K. (2011). Discrimination of iron ore deposits of granulite terrain of Southern Peninsular India using ASTER data: **Journal of Asian Earth Sciences**, v, 41, no, 1, p, 99-106.

Ramanaidou, E., Wells, M., Belton, D., Verrall, M., & Ryan, C. (2008). **Mineralogical and microchemical methods for the characterization of high-grade banded iron formation-derived iron ore**. In: Hagemann, S., Rosiere, C., Gutzmer, J., Beukes, N. (Eds.), *Reviews in Economic Geology: Banded Iron Formation-Related High-Grade Iron Ore*, Society of Economic Geologists. Westminister, CO, USA, pp. 129– 156.

Sabins, F. F. (1997). **Remote Sensing — Principles and Interpretation**, 3rd edn., W,H, Freeman, New York, NY., 494 pp.

Salisbury, J. W., & G. R. Hunt. (1968). Martian surface materials-Effect of particles size on spectral behaviors, **Science**, 1, 61,365-366.

Sanches, M., Tinoco, D., Dalvi, B & Urbim, E. (2015). **Tragédia pode afetar abastecimento de água de 500 mil pessoas**. Disponível em: <https://oglobo.globo.com/politica/tragedia-pode-afetar-abastecimento-de-agua-de-500-mil-pessoas-17998445>. Acesso em: 04/06/2024.

Singer R. B. (1981). Near-infrared spectral reflectance of mineral mixtures – Systematic combinations of pyroxenes, olivine, and iron oxides, **Journal of Geophysical Research**, 86:7967-7982.

Silva, E. R. A. C., da Silva Melo, J. G., de Assis, D. R. S., de Santana, S. H. C., & Galvêncio, J. D. (2018). O desafio da gestão ambiental de florestas urbanas: análise da degradação ambiental da Reserva de Floresta Urbana Mata do Janga-PE através de técnicas de sensoriamento remoto. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, 7(3), 454-469.

SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA, **In: Suporte Geográfico**, Disponível em: <https://suportegeografico77.blogspot.com/2019/10/sistemas-de-informacao-geografica.html>, Acesso em: 11/06/ 2024,

Teódulo, J. M. R. (2014). **Geocologia das paisagens na bacia hidrográfica do rio Gramame-PB com auxílio de sensoriamento remoto e sistemas de informações geográficas**. 208 f. Tese (Doutorado em geografia)- Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE, 2014.

Townsend, T, E, (1987), Discrimination of iron alteration minerals in visible and near - infrared reflectance data, **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, 92(B2), 1441-1454