

UFRRJ
INSTITUTO DE FLORESTAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS E
FLORESTAIS

DISSERTAÇÃO

CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS E COMPORTAMENTO
ESPECTRAL DE ÁGUAS CONTAMINADAS POR REJEITOS DE
MINERAÇÃO: O CASO DE MARIANA, MG

MERI DIANA STRAUSS FOESCH

2017



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FLORESTAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS E
FLORESTAIS

DISSERTAÇÃO
CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS E COMPORTAMENTO
ESPECTRAL DE ÁGUAS CONTAMINADAS POR REJEITOS DE
MINERAÇÃO: O CASO DE MARIANA, MG

MERI DIANA STRAUSS FOESCH

Sob a Orientação do Professor

Márcio Rocha Francelino

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Ciências, no Curso de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais, Área de Concentração Conservação da Natureza.

Seropédica, RJ

Fevereiro, 2017

F 654
c Foesch, Meri Diana Strauss , 1987-
Características físico-químicas e comportamento
espectral de águas contaminadas por rejeitos de
mineração: o caso de Mariana - MG / Meri Diana Strauss
Foesch. - 2017.
76 f.: il.

Orientador: Márcio Rocha Francelino.
Dissertação (Mestrado). -- Universidade Federal Rural
do Rio de Janeiro, Programa de Pós-graduação em
Ciências Ambientais e Florestais, 2017.

1. Sensoriamento remoto. 2. Qualidade da água. I.
Francelino, Márcio Rocha , 1966-, orient. II
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.
Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais e
Florestais III. Título.

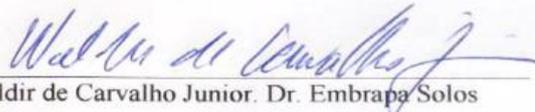
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FLORESTAS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS E FLORESTAIS

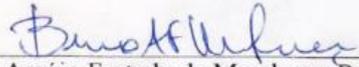
MERI DIANA STRAUSS FOESCH

Dissertação/Tese submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Ciências**, no Curso de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais, Área de Concentração em Conservação da Natureza.

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 22/02/2017


Márcio Rocha Francelino Prof. Dr. UFV/PPGCAF
(Orientador)


Waldir de Carvalho Junior. Dr. Embrapa Solos


Bruno Araújo Furtado de Mendonça Prof. Dr. UFRRJ

I

*O Rio? É doce.
A Vale? Amarga.
Ai, antes fosse
Mais leve a carga.*

II

*Entre estatais
E multinacionais,
Quantos ais!*

III

*A dívida interna.
A dívida externa
A dívida eterna.*

IV

*Quantas toneladas exportamos
De ferro?
Quantas lágrimas disfarçamos
Sem berro?*

Poema “Lira Itabirana”, de Carlos Drummond de Andrade, 1984.

LISTA DE SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANA - Agência Nacional de Águas
AR - Afloramento de Rocha
AWEI - *Automated Water Extraction Index*
CETEC - Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais
CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente
CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
CZCS - *Coastal Zone Color Scanner*
EROS - *Earth e Resources Observation and Science Center*
ESA - *European Spacy Agency*
ETM - *Enhanced Thematic Mapper*
FEAM - Fundação Estadual de Meio Ambiente
GPS - *Global Positioning System*
IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IBRAM - Instituto Brasileiro de Mineração
IGAM - Instituto Mineiro de Gestão das Águas
INMET - Instituto Nacional de Meteorologia
IRS - *Indian Remote Sensing*
MMA - Ministério do Meio Ambiente
MNDWI - *Modified Normalized Difference Water Index*
MSI - *Multi Spectral Instrument*
NBR - Norma Brasileira Regulamentadora
NDWI - Normalized Difference Water Index
NIR - *Near Infrared*
OLI - *Operational Land Imager*
RF – *Random Forests*
RFE – *recursive feature elimination*

RESUMO GERAL

FOESCH, Meri Diana Strauss. **Características físico-químicas e comportamento espectral de águas contaminadas por rejeitos de mineração: o caso de Mariana, MG.** 2016. 70 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais e Florestais). Instituto de Florestas, Departamento de Ciências Ambientais, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2016.

A mineração é uma atividade econômica que gera muitos impactos negativos no meio ambiente. Os recursos hídricos são os mais expostos a sofrerem tais impactos em função das imensas barragens que são construídas para armazenar os rejeitos da atividade, e estas, podem conter vazamentos, infiltrações e até se romper. O rompimento da barragem de Fundão, em Mariana, causou o maior desastre ambiental do Brasil. No dia 5 de novembro de 2015, os rejeitos armazenados na barragem atingiram violentamente os rios a sua jusante, em maior concentração os rios Gualaxo do Norte e do Carmo, até a usina de Risoleta Neves e após ela, o Rio Doce, até o oceano Atlântico. Este trabalho, organizado em dois capítulos, analisou a situação das características físico-químicas da água dos rios Gualaxo do Norte e do Carmo em relação a Resolução 357/05 do CONAMA, após o rompimento da barragem de Fundão, e relacionou com as características espectrais nos mesmos pontos usando imagens Sentinel-2 e Landsat-8, Foram coletadas trinta e seis amostras físico-químicas distribuídas em seis amostras por mês (no dia da varredura do satélite, ou próximo à data, e sempre nos mesmos pontos) em seis meses (abril a setembro de 2016), enquanto as imagens utilizadas foram as de abril, julho, agosto e setembro de 2016 (as de maio e junho foram descartadas pela alta cobertura de nuvens que apresentaram). Foram analisadas a turbidez, cor e metais dissolvidos e suspensos da água e utilizados os métodos de predição por *Random Forest* e Regressão Linear para com as bandas dos satélites e índices espectrais (*NDWI*, *MNDWI*, *AWEI_{sh}*, *AWEI_{insh}*, *WRI*, *K-T Wetness*, *FII*, *NDVI*). Os resultados mostraram que os teores de metais, cor e turbidez e demais variáveis das águas contaminadas dos rios poluídos pelo rejeito de mineração apresentaram valores acima dos permitidos na Resolução 357/05 CONAMA, e estiveram altamente correlacionadas com os índices espectrais, a banda 8 Sentinel-2 e banda 5 Landsat-8. Concluiu-se que as imagens dos satélites Landsat 8 e Sentinel 2A, podem ser usadas para estimar e monitorar as características físico-químicas nas águas dos rios afetadas pelo rompimento da barragem de Fundão, o que pode servir para verificar se águas de outros rios vêm adquirindo estas características, como forma de monitoramento e demais alterações causadas pela exploração de minérios nos mananciais.

Palavras-chave: Sentinel-2, Landsat-8, qualidade da água.

GENERAL ABSTRACT

FOESCH, Meri Diana Strauss. **Physical-chemical characteristics and spectral behavior of water contaminated by mining tailings: the case of Mariana, MG.** Dissertation (Master Degree in Environment and Forest Science). Instituto de Florestas, Departamento de Ciências Ambientais, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2016.

Mining is an economic activity that has many negative impacts on the environment. Water resources are the most affected by mining, the huge dams are built to store the tailings of the activity, and these, can contain leaks, infiltrations and even break. The rupture of the Fundão dam in Mariana caused the greatest environmental disaster in Brazil. On November 5, 2015, the rejects stored in the dam are violently applied in the rivers downstream, in great concentration of the rivers Gualaxo do Norte and Carmo, until at Risoleta Neves and then down Rio Doce, until the Atlantic Ocean. This work, organized in two chapters, analyzed the physical-chemical characteristics of the water of the Gualaxo do Norte and Carmo Rivers in relation to Resolution 357/05 of CONAMA, after the dam disruption of Fundão and related Sentinel-2A and Landsat-8. 36 physico-chemical samples were collected in six by six samples (without satellite scan day, or near data, and without the same points) in six months (April to September 2016), while The images were approved in April, July, August and September 2016 (as of May and June were discarded by the high cloud cover they presented). Random Forest and Linear Regression prediction methods were applied to satellite bands and spectral indices (NDWI, MNDWI, AWEIsh, AWEInsh, WRI, KT Wetness, NDVI). The results showed that the values of metals, color and turbidity and other variables of the polluted waters of the rivers polluted by the mining waste presented values higher than those allowed in CONAMA Resolution 357/05 and highly correlated with the spectral indices, the band 8 Sentinel – 2A and Landsat-8 band 5. It was concluded that as images of the satellites Landsat 8 and Sentinel-2A, it can be used to estimate and monitor how the physico-chemical characteristics of the waters of the rivers affected by the rupture of the Fundão dam, which can be used to verify if waters of other rivers Come to acquire these characteristics as a form of monitoring and other changes caused by the exploitation of ores in the springs.

Keywords: Sentinel-2, Landsat-8, water quality.

Sumário

RESUMO GERAL	7
GENERAL ABSTRACT	8
INTRODUÇÃO GERAL	11
ÁREA DE ESTUDO.....	13
CAPÍTULO I – ALTERAÇÕES FÍSICO-QUÍMICAS DAS ÁGUAS DOS RIOS GUALAXO DO NORTE E DO CARMO CONTAMINADAS POR PLUMA DE REJEITOS DE MINERAÇÃO.....	17
RESUMO.....	17
ABSTRACT	18
1. INTRODUÇÃO.....	18
2. MATERIAIS E MÉTODOS	20
2.1 Área de estudo	20
2.2 Coleta de dados	24
2.3 Análises físico-químicas	27
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
4. CONCLUSÕES.....	41
CAPÍTULO II – AVALIAÇÃO DE RESPOSTA ESPECTRAL DA ÁGUA CONTAMINADA POR PLUMA DE REJEITOS DE MINERAÇÃO UTILIZANDO IMAGENS LANDSAT 8 E SENTINEL 2.....	42
RESUMO.....	42
ABSTRACT	43
1. INTRODUÇÃO.....	44
2. REVISÃO DE LITERATURA	45
2.1 Landsat 8.....	47
2.2 Sentinel 2	49
2.3 Índices espectrais da água	50
3. MATERIAIS E MÉTODOS	51
3.1 Área de estudo	51
3.2 Análises físico-químicas	52
3.3 Satélites e Sensores.....	53

3.4	Geoprocessamento	53
3.5	Índices espectrais da água	55
3.6	Análise estatística.....	56
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	59
4.1	<i>Random Forests</i> (RF)	59
4.2	Regressão Linear	65
5.	CONCLUSÕES.....	69
	REFERÊNCIAS.....	70

INTRODUÇÃO GERAL

A água é um recurso fundamental para o funcionamento dos ecossistemas. O ser humano depende dela para as suas necessidades básicas, além das atividades econômicas e industriais, as quais demandam muito dos recursos hídricos e neles causam impactos, como ocorre com a atividade de mineração, um dos maiores segmentos da economia brasileira, o qual é uma fonte pontual e concentrada de poluição das águas subterrâneas ou superficiais.

A mineração de ferro, uma das principais do setor, lida com enorme quantidade de elementos potencialmente tóxicos, que podem ser mobilizados para o ambiente durante ou após o processo de mineração (PARRA, 2006). Ou seja, tanto o solo como a água estão susceptíveis a sofrer contaminação com o lançamento de rejeitos.

As principais atividades de exploração mineral no Brasil são aquelas relacionadas à extração de ferro e minério de ferro, que somam 31,4% (Costa et al., 2001). As lavras de ferro e minério de ferro na região de Mariana (MG) se concentram, de modo geral, nas cabeceiras do rio Piracicaba, um dos principais afluentes do Doce e, em parte das cabeceiras dos rios Gualaxo e do Carmo (IBRAM, 2015).

As minas de ferro dessa região operam à base de elevado grau de mecanização e equipamentos pesados, são empreendimentos de grandes empresas. As duas principais mineradoras que atuam na bacia do Rio Doce são a Vale S.A. e a Samarco Mineração, as duas maiores produtoras de minério de ferro do país (IBRAM, 2015).

Apesar da maior parte dos rejeitos das mineradoras da região de Mariana (MG) ficarem armazenados em barramentos, parte dele chega nos cursos d'água da bacia do rio Doce, os quais funcionam como canais receptores, transportadores e autodepuradores dos rejeitos e efluentes produzidos por essas atividades econômicas, além dos esgotos domésticos da grande maioria dos municípios, o que compromete a qualidade da água segundo constatação de MMA (2016).

O maior desastre ambiental relacionado à exploração da mineração no Brasil ocorreu no dia 05 de novembro de 2015, no município de Mariana, Minas Gerais, mediante o rompimento da barragem de Fundão, da mineradora Samarco, dirigida pela BHP Billiton Brasil Ltda e Vale S.A. Segundo IBAMA (2015a), somente

na barragem de Fundão, havia aproximadamente 50 milhões de m³ de resíduos, classificados, segundo a NBR 10.004, como sólidos, não perigosos e não inertes, como o ferro e o manganês, ou seja, sua composição era formada basicamente por areia e metais. Deste total, estima-se que 16 milhões de m³ de rejeitos permaneceram acumulados próximos ao local do incidente e cerca de 32 milhões m³ foram extravasados e atingiram uma altura de 5,5 m. Estima-se que aproximadamente 80% desse material ficou retido ao longo dos primeiros 100 km, envolvendo os rios Gualaxo do Norte, Carmo, Piranga e Doce até a usina Risoleta Neves, e a lama de rejeitos percorreu no total 663 km lineares no rio Doce e seus afluentes (CPRM, 2015b).

Em relação à ruptura de barragens da América do Sul, esta representa, até agora, a maior distância percorrida pelos rejeitos (recorde anterior é de cerca de 300 km na Bolívia em 1996) (IBAMA, 2015a).

A destruição dos ecossistemas ribeirinhos, de água doce e marinhos acabou com os recursos naturais renováveis e os processos ecológicos que suportam os meios de subsistência tradicionais, perturbando a pesca, a agricultura, o turismo e o fornecimento de água doce (FERNANDES et al., 2016).

A capacitação institucional para um melhor desempenho ambiental através de regimes reguladores fortes, avaliações integradas do impacto ambiental e monitoramento preventivo é uma prioridade imediata para prevenir ou minimizar os impactos catastróficos e irreversíveis como os observados em Minas Gerais (FERNANDES, et al., 2016). Do contrário, a aplicação frouxa das regulamentações ambientais nacionais e estaduais do setor de mineração no Brasil, juntamente com a abordagem periférica para a gestão de Instalações de Armazenamento de Resíduos pelas empresas de mineração, criam um portfólio de grande responsabilidade sobre estado (LABONNE, 2016).

Segundo IBAMA (2016b), é necessário um monitoramento contínuo dos parâmetros de qualidade nas águas dos rios afetados por este acidente. Para isso seria necessário um grande esforço amostral, o que representaria um elevado custo, principalmente considerando o tempo indeterminado para recuperação deste ecossistema.

Sendo assim, este trabalho teve como objetivo geral analisar o comportamento espectral das águas contaminadas dos rios afetados pelo rompimento da barragem de Fundão, em imagens orbitais, de forma a facilitar a

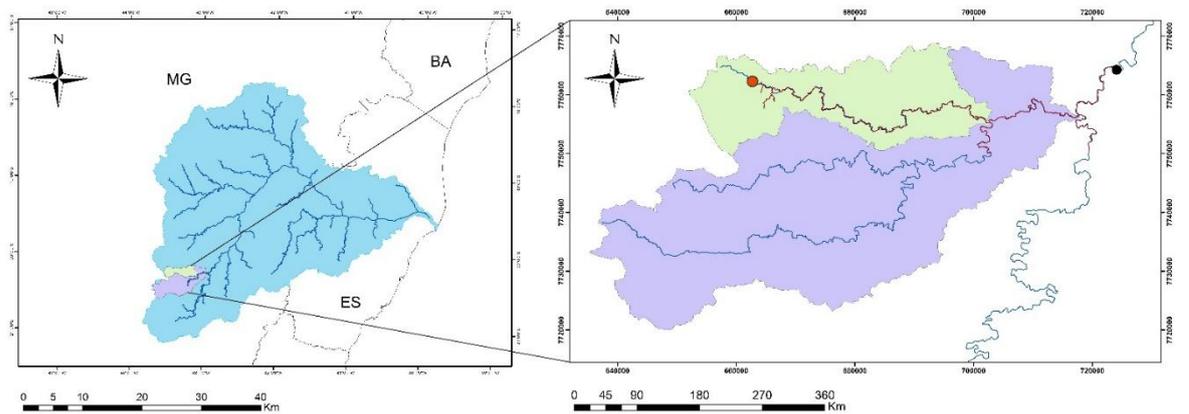
análise de atributos das águas superficiais com características de contaminação por materiais de mineração através do uso de sensoriamento remoto e geoprocessamento.

A finalidade do primeiro capítulo intitulado “*Alterações físico-químicas das águas dos rios Gualaxo do Norte e do Carmo contaminadas por pluma de rejeitos de mineração*” foi apresentar os dados físico-químicos da água dos rios Gualaxo do Norte e do Carmo no período de abril a setembro de 2016, após o colapso da barragem de Fundão. Os resultados são apresentados e discutidos comparando com trabalhos anteriores ao desastre e ao padrão de qualidade de água estabelecido pela Resolução CONAMA 357/05.

No segundo capítulo “*Avaliação de resposta espectral da água contaminada por pluma de rejeitos de mineração utilizando imagens Landsat 8 e Sentinel 2*” avaliou-se o potencial de imagens orbitais disponibilizadas gratuitamente para estimar e monitorar as características físico-químicas nas águas dos rios afetadas pelo rompimento da barragem de Fundão através da correlação entre a reflectância registrada na imagens com os respectivos teores de metais, cor e turbidez e demais variáveis das águas contaminadas pelo rejeito de mineração com análises *in situ* das características físicas e químicas da água.

ÁREA DE ESTUDO

Este estudo compreende os rios que receberam o primeiro contato com a pluma de rejeitos do rompimento da barragem de Fundão no distrito de Bento Rodrigues, no município de Mariana, no Estado de Minas Gerais, Brasil (Figura 1). São eles: o Rio Gualaxo do Norte, que foi o primeiro a ser atingido pela pluma de rejeitos e na sua foz se misturou, revolveu e erodiu o Rio do Carmo (Figura 2), o outro rio considerado nesse estudo, até a afluição do rio Piranga, formando o Rio Doce, indo até a Usina Risoleta Neves, onde a maior parte dos materiais erodidos, e de grande porte, ficaram retidos.



Legenda

- | | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  Bacia do rio Gualaxo do Norte |  Bacia do rio Doce |  Barragem de Fundão |  Caminho da Lama |
|  Bacia do rio do Carmo |  Limites Estaduais |  Usina Hidreletrica Risoleta Neves |  Hidrografia |

Figura 1: Localização dos rios da área de estudo.



Figura 2. Foz do Rio Gualaxo do Norte (à esquerda) no Rio do Carmo (à direita). Percebe-se a diferença de cor das águas.

De acordo com a classificação de Köppen (1948), o clima da região das sub-bacias é o Cwa; clima temperado com inverno seco e verão chuvoso, a temperatura média do mês mais frio é inferior a 18°C e a do mês mais quente superior a 22°C, do tipo mesotérmico brando e semi-úmido, possui de quatro a cinco meses de estiagem por ano. Em média, a estação chuvosa se estende de outubro a março; e a estação seca, se estende de junho a setembro.

Morfologicamente, conforme revisão de Costa (2001), a região é caracterizada pelo desenvolvimento de elementos fisiográficos que se bifurcam no

Alto do Conta História, cujos ramos são constituídos pela Serra de Antônio Pereira (Sudeste), Serra Geral (Noroeste) e Serra do Caraça (Norte). Estas serras são suportadas por espessas camadas de quartzitos da Formação Moeda e pelas camadas ferríferas da Formação Cauê recobertas por canga (ENDO, 1988), cuja preservação local deve-se a uma elevada capacidade de resistência original ou ao desenvolvimento dos mantos de canga que protegem estas formações.

Por outro lado, a unidade representada pelos Planaltos Dissecados do Centro-Sul e Leste de Minas ocupa cerca de 70-80% da área das sub-bacias dos rios estudados, é representada no médio e baixo curso do Gualaxo do Norte. Conforme revisto por Costa (2001), esta unidade é caracterizada por colinas e cristas com vales encaixados e/ou de fundo chato, formas derivadas da dissecação fluvial atuante sobre rochas predominantemente granito-gnáissicas. As altitudes variam entre 1.000 e 1.200 m nas cristas e 500 a 800 m nos vales.

Pedologicamente, pode-se observar na Figura 3, que a área das cabeceiras é ocupada por afloramentos de rochas (AR), para o rio Gualaxo do Norte e localmente apresentando manchas de Neossolos Litólicos distrófico típico (RLd) (solos pouco desenvolvidos) e Cambissolos Háplicos Tb distróficos (CXbd), ambos saturados com alumínio e de textura arenosa cascalhenta, mas em ambas bacias predomina o Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (LVAd), que são solos bastante intemperizados e profundos, de textura argilosa e dessaturados em bases. À jusante, os leitos dos rios ocorrem regiões com domínio de Argissolos Vermelho-Amarelo eutróficos (PVAe) (UFV, CETEC, UFLA, FEAM, 2010).

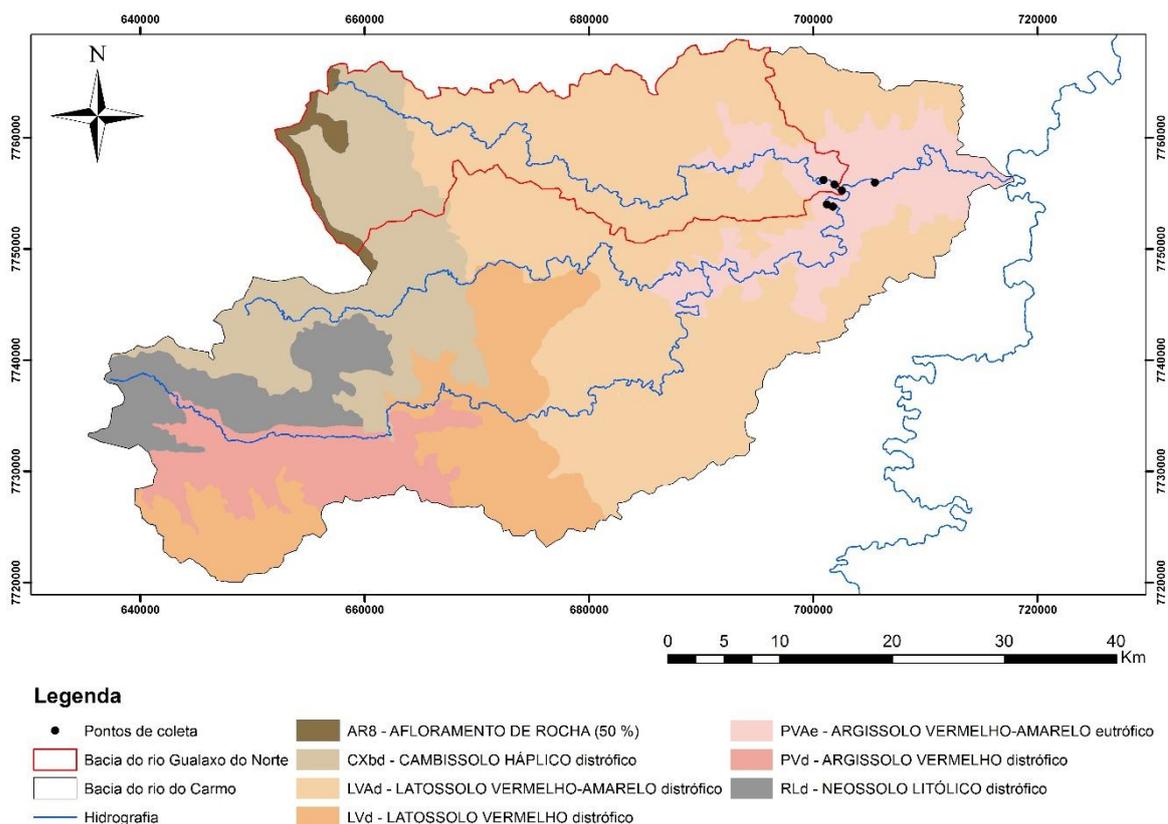


Figura 3: Solos da área de estudos (UFV, CETEC, UFLA, FEAM, 2010).

As sub-bacias se encontram na paisagem de “Mares de Morros”, também chamados como Colinas da Zona da Mata ou como as Áreas Mamemolares Tropical-Atlânticas Florestadas (AB’SABER, 2007), determinado pelas características do material de origem cristalino associado a dinâmica de águas superficiais. O baixo grau de permeabilidade favorece a divergência da água, direcionando o fluxo para as arestas da rocha onde são possíveis reações com inúmeros minerais, permitindo a intemperização química a partir das extremidades do material de origem, conferindo formato arredondado a rochas ou, quando se trata de paisagens, as feições convexas ou lineares. Já a convergência do fluxo de águas superficiais por diaclases ou linhas de drenagem, favoreceram a intemperismo químico e mecânico do material de origem, dá procedência a pedoformas côncavas, promove variações no solo, determina o grau de intemperismo e processos erosivos, e conseqüentemente a evolução da paisagem (CASSETI, 2013).

CAPÍTULO I – ALTERAÇÕES FÍSICO-QUÍMICAS DAS ÁGUAS DOS RIOS GUALAXO DO NORTE E DO CARMO CONTAMINADAS POR PLUMA DE REJEITOS DE MINERAÇÃO

RESUMO

Os rios Gualaxo do Norte e do Carmo, foram os primeiros a receber a grande massa de rejeitos advindos da barragem de Fundão, Mariana – MG, com o seu rompimento, em 05 de novembro de 2015. Esses rejeitos ocasionaram grandes alterações tanto no leito quanto na qualidade das águas desses corpos hídricos. Este trabalho teve o objetivo de avaliar as características físico-químicas da água dos rios Gualaxo do Norte e do Carmo após o rompimento da barragem, comparar com resultados de estudos sobre a situação anterior ao rompimento da barragem de Fundão e com os limites estabelecidos na Resolução 357/05 do CONAMA. Para isso foram coletadas amostras de água em seis pontos, as quais foram analisadas para se determinar valores de turbidez, cor, metais dissolvidos e metais suspensos na água desses rios, em locais próximos de sua confluência à Barra Longa – MG. Os resultados foram comparados com trabalhos anteriores ao rompimento da barragem e com os valores padrões recomendados pela Resolução CONAMA 357/05, a qual dispõe da classificação das águas doces e salgadas e recomendação de uso. As características físico-químicas das águas de um manancial que sofreu uma grande agressão poluidora podem revelar o grau dessa poluição e chegar a alternativas para sua recuperação. Os valores de turbidez, cor, ferro e elementos associados ainda estão muito acima do natural e dos valores limites da Resolução CONAMA 357/05. Deve-se investigar de forma mais específica e especializada as possíveis interações entre as substâncias e a presença de contaminantes não citados na resolução, bem como o estudo de técnicas para reduzir os teores destes elementos.

Palavras-chaves: Teor de ferro; turbidez; qualidade da água; impacto ambiental

ABSTRACT

The North Gualaxo and Carmo rivers, were the first to receive the charge of mining rejecsts arising from Fundão dam, Mariana - MG, because his break, on November 5, 2015. Great changes have occurred in both the bed and the quality of the water bodies, because this rejects. The objective of this work was to evaluate how the water's physicochemical characteristics of the Gualaxo do Norte and Carmo rivers after the dam rupture, compare with the results of studies on a situation prior to the dam breaking of Fundão and with the limits established in Resolution 357/05 of CONAMA. For this purpose, water samples was collected at six points, such analyzed to determine values of turbidity, color, dissolved metals and metals suspended in river water, at their locations close to their junction at Barra Longa - MG. The results was compared with previous work for the evaluation and the values are recommended by CONAMA Resolution 357/05 that lay out the classification of the fresh waters and salty waters and the usage recommendations. The physicochemical characteristics of the waters of a source that has undergone a great polluting aggression can reveal the degree of this pollution and arrive at alternatives for its recovery. The values of turbidity, color, iron and associated elements are still much higher than the natural values and limits of CONAMA Resolution 357/05. It is necessary to investigate in a more specific and specialized way the possible interactions between the substances and the presence of contaminants not mentioned in the resolution, as well as the study of techniques to reduce the contents of these elements.

Keywords: Iron Amounts; Turbidity; Water Quality; Environmental Impact.

1. INTRODUÇÃO

Existem muitas fontes poluidoras da água, dentre elas a mineração, que geralmente provoca grandes alterações no meio físico da área onde é instalada. As principais alterações que podem ser esperadas se referem ao grande volume de rejeitos minerais que são lançados nos corpos hídricos, elevando a concentração de sólidos em suspensão, a turbidez, a presença de substâncias dissolvidas que alteram as suas propriedades físico-químicas, a presença de concentrações

anômalas de sais solúveis, alcalinidade, óleo, graxa e reagentes orgânicos (COSTA, 2001).

No dia 05 de novembro de 2015 ocorreu o rompimento da barragem do Fundão, pertencente a empresa Samarco S.A. e localizada no município de Mariana (MG), considerado o maior desastre ambiental da história do Brasil, quando foram lançados 34 milhões de m³ de rejeitos de mineração de ferro nos rios do Carmo, Gualaxo do Norte e Doce, além do Oceano Atlântico na área costeira do norte do estado do Espírito Santo e sul da Bahia (IBRAM, 2015). O rompimento da barragem formou uma grande onda de lama que transbordou o leito dos rios: 55km lineares, no rio Gualaxo do Norte mais 22 km lineares no rio do Carmo, até chegar ao rio Doce. Esse trecho inicial de 77 km lineares foi o mais afetado, onde milhões de toneladas de sedimentos foram depositados nos antigos terraços fluviais.

Bowker e Chambers (2015) observaram o crescimento da ocorrência de rompimentos graves e muito graves, ao avaliar rompimentos de barragens ocorridos entre 1910 e 2010, identificando mais de 30 rompimentos no mundo após a década de 1990. Os autores argumentam que tal tendência é um reflexo das tecnologias modernas de mineração, que permitem a implantação de “megaminas”, construídas para extrair minérios a partir de reservas caracterizadas por concentrações minerais cada vez menores. À medida que a qualidade dos minérios diminui, aumenta a quantidade de rejeitos e, conseqüentemente, o tamanho das barragens.

Nas áreas de mineração de ferro no Quadrilátero Ferrífero, pesquisas revelaram um incremento de material em suspensão nos rios e aumento da turbidez nas águas como impactos decorrentes da atividade de mineração (COSTA, 2001; PARRA, 2006). Ainda segundo Costa (2001), as principais alterações físicas que esses sedimentos podem ocasionar são: elevação da turbidez devido ao grande volume de sólidos em suspensão; alteração no pH, na condutividade elétrica e temperatura. Na superfície esses sedimentos elevam a concentração de material particulado, reduzindo a penetração da luz e afetando o processo de fotossíntese pelas plantas aquáticas (RIPLEY, 1996) e na coluna de água pode produzir efeito tóxico crônico nos peixes (KEMKER, 2014).

A concentração, duração da exposição, composição química e a granulometria dos sedimentos são os fatores que determinarão o grau de efeitos nos organismos aquáticos. As partículas finas são as que permanecem mais tempo

em suspensão e apresenta a maior capacidade de dispersão da sua área fonte, o que representa uma ameaça em longo prazo para a biota (BILOTTA & BRAZIER, 2008).

Este estudo teve como objetivo avaliar a situação das características físico-químicas da água dos rios Gualaxo do Norte e do Carmo após o rompimento da barragem, comparar com resultados de estudos sobre a situação anterior ao rompimento da barragem de Fundão e com os limites estabelecidos na Resolução 357/05 do CONAMA.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

A área de estudo compreende a foz do Rio Gualaxo do Norte, na cidade de Barra Longa e a alguns metros à montante desta, no Rio do Carmo (Figura 4).

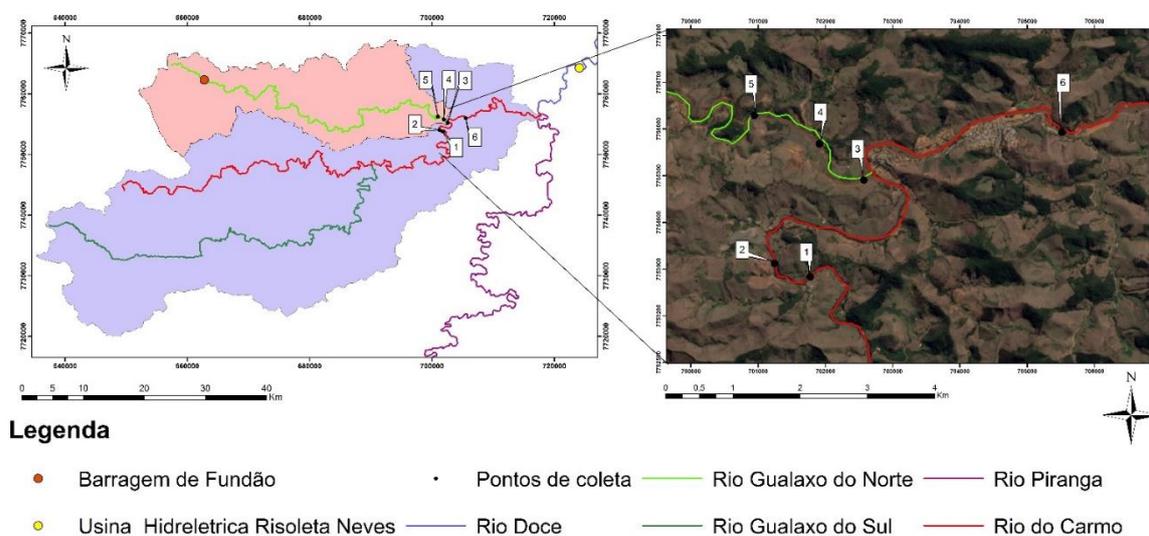


Figura 4: Localização dos pontos de coleta *in situ*.

O rio Gualaxo do Norte tem suas cabeceiras próximas ao distrito de Antônio Pereira (Ouro Preto-MG) e Bento Rodrigues (Mariana-MG) (SOUZA; SOBREIRA; PRADO-FILHO, 2005). Segue seu médio curso em direção a leste e deságua no rio do Carmo, no município de Barra Longa-MG (COSTA, 2001). O rio do Carmo,

após a confluência com o rio Piranga, segue em direção à Ponte Nova, com a designação de rio Doce.

O rio do Carmo possui junto à cabeceira, no município de Ouro Preto, os seus principais formadores: o ribeirão do Funil e o córrego do Tripuí, que nascem na Serra do Veloso. Corre por uma extensão de 134km, sua foz encontra-se no município de Rio Doce, na confluência com o rio Piranga, quando formam o rio Doce. Entre seus afluentes destacam-se, pelo porte, os rios Gualaxo do Norte, pela margem esquerda, e Gualaxo do Sul, pela margem direita (BARBOSA et al, 2005).

O rio do Carmo possui histórico de exploração de minério em sua cabeceira, no Quadrilátero Ferrífero em Mariana, MG. Foi também a primeira região a sofrer exploração de minério de ouro no Brasil. A bacia apresenta um quadro de grande supressão da cobertura vegetal, estando os remanescentes florestais restritos às áreas mais declivosas do terreno. A paisagem atual é principalmente composta por pastagens, que se encontram bastante degradadas, o que proporciona uma superfície suscetível à erosão do solo, formando volumes expressivos de sedimentos que são carregados aos cursos d'água (MMA, 2016).

Observa-se em CPRM (2014a) que a cabeceira do Rio Gualaxo do Norte está situada no domínio de rochas supracrustais, principalmente representadas por quartzitos, itabiritos e filitos do Supergrupo Minas (Figura 5), enquanto seu médio e baixo cursos drenam litotipos gnáissicos e metabásicos, característicos dos Complexos Metamórficos, além de xistos e quartzitos do Supergrupo Rio das Velhas. Estas sequências constituem fontes naturais de metais pesados para o meio ambiente.

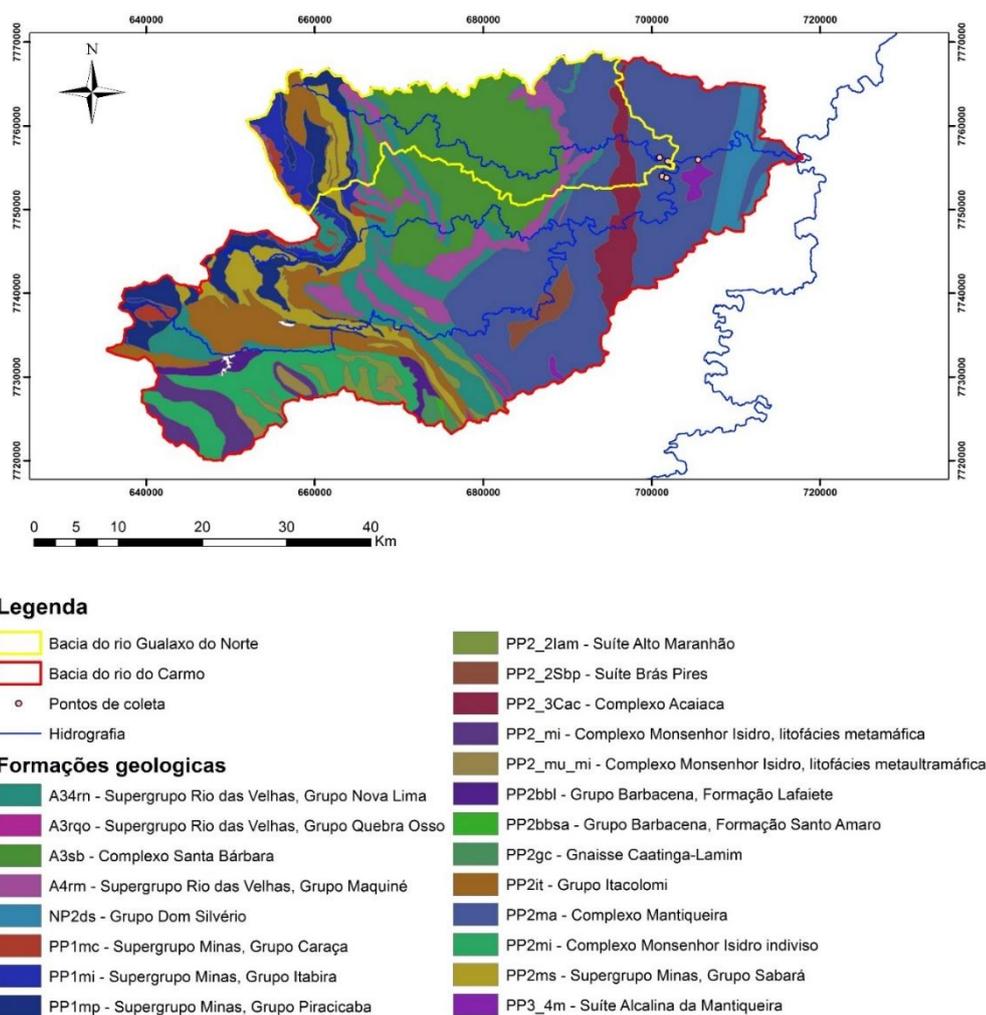


Figura 5: Mapa geológico do estado de Minas Gerais. Adaptado de CPRM (2014a).

A fitofisionomia que caracteriza a região é a Floresta Estacional Semidecidual, como principais famílias a Fabaceae, Rubiaceae, Lauraceae, Myrtaceae, Euphorbiaceae, Annonaceae e Flacourtiaceae, mas também possui elementos de Cerrado e Floresta de Altitude (GONÇALVES et al., 2011). Os autores constataram que a vegetação se encontra em estágio médio de sucessão ecológica e as espécies com maior dominância são: *Croton floribundus*, *Inga sessilis*, *Hyeronima alchorneoides*, *Casearia sp.*, *Criptocarya aschersoniana*, *Platypodium elegans*, *Cupania vernalis*, *Cecropia glasiovi*, *Pseudopiptadenia contorta* e *Casearia Gossypioperma*.

As pastagens degradadas predominam como uso do solo, mesmo nas margens dos rios (IGAM, 2015a). Nas cabeceiras, a vegetação sofreu

desmatamento para exploração mineral, ou foi substituída pelos plantios comerciais de eucalipto.

A passagem da pluma de rejeitos elevou extraordinariamente a concentração de sedimentos e os níveis de turbidez em todo o rio Doce por vários dias (Figura 6). Isso resultou na interrupção total ou parcial do abastecimento de água de 12 cidades que captam água diretamente no rio Doce, afetando uma população estimada em 424.000 pessoas (IGAM,2016b). Além disso, 143 captações de água outorgadas pela ANA podem ter sido impactadas, das quais, 88 para fins industriais, 46 para fins de irrigação, três para criação de animais, e seis



para outros usos (IGAM,2016b).

Figura 6: Margem do rio Gualaxo do Norte, 07/12/2015. (Foto: Márcio R. Francelino).

Com o colapso da barragem a retirada de *topsoil* ao longo do rio Gualaxo do Norte foi intensa na região dos lateritos, por ser um material de origem frágil e estar a alta declividade, em seguida houve deposição gradual na calha e margens (SCHAEFER, 2016). Nos segmentos meandantes do leito causados pelas falhas geológicas a lama se depositou em curvas e nos trechos retilíneos há maior carreamento da lama. Além de toda a destruição, pelo grande volume deslocado, esse material irá fornecer, por tempo indeterminado, uma grande e variada quantidade de sedimentos para esses rios, cujo grau de intensidade estará

relacionado diretamente com o volume de precipitação e o tipo de intervenções que se irão realizar nas áreas afetadas.

No primeiro mês de monitoramento, nos dois primeiros trechos localizados no rio Doce, à montante da represa de Candonga e entre Candonga-Baguari, observados valores de turbidez da ordem de centenas milhares de unidades de turbidez. Como, por exemplo, na estação no município de Marliéria, que apresentou o maior valor para esse parâmetro (606.200 NTU) no dia 7 de novembro de 2015 (IGAM, 2016b). A passagem do pico da pluma de sedimentos durou aproximadamente cinco dias, mas o tempo durante o qual os níveis de turbidez ficaram acima de 1.000 Unidades Nefelométricas de Turbidez (UNT) em cada trecho do rio Doce foi superior a trinta dias. O abastecimento público nas principais cidades, após adaptações nas estações de tratamento de água, foi retomado gradativamente (IGAM,2016b).

2.2 Coleta de dados

Foram coletados seis pontos em cada data de campo (21/04; 24/05; 20/06; 07/07; 10/08; 12/09), gerando, no total, o número de 36 amostras, com as coordenadas na Tabela 1.

Tabela 1: Coordenadas UTM dos pontos de coleta

Ponto de coleta	Oeste (X)	Sul (Y)
1	701765,29	7753795,35
2	701194,53	7754154,90
3	702564,40	7755236,57
4	701914,49	7755765,50
5	700856,03	7756153,80
6	705524,77	7755944,32

Os pontos de coleta foram distribuídos de forma que três deles estão localizados no Rio do Carmo – dois antes da foz do Gualaxo do Norte (Figuras 7.1 e 7.2), um após o deságue deste rio (Figura 7.6), e três no Rio Gualaxo do Norte antes de desaguar no rio do Carmo (Figura 7.3, 7.4 e 7.5).



Figura 7: Pontos de coletas *in situ*: (7.1) Primeiro ponto; (7.2) ponto dois; (7.3) ponto três; (7.4) ponto quatro; (7.5) ponto cinco; (7.6) ponto seis.

Os pontos foram escolhidos próximos à cidade de Barra Longa (Figura 8), pela representação em relação à montante dos rios desde a barragem de Fundão até a usina hidrelétrica de Risoleta Neves e pela facilidade de acesso aos locais, já que, devido ao colapso da barragem, e intervenções pela empresa Samarco, muitos locais estão sem vias de acesso e sem condições de segurança de coleta de água do leito.

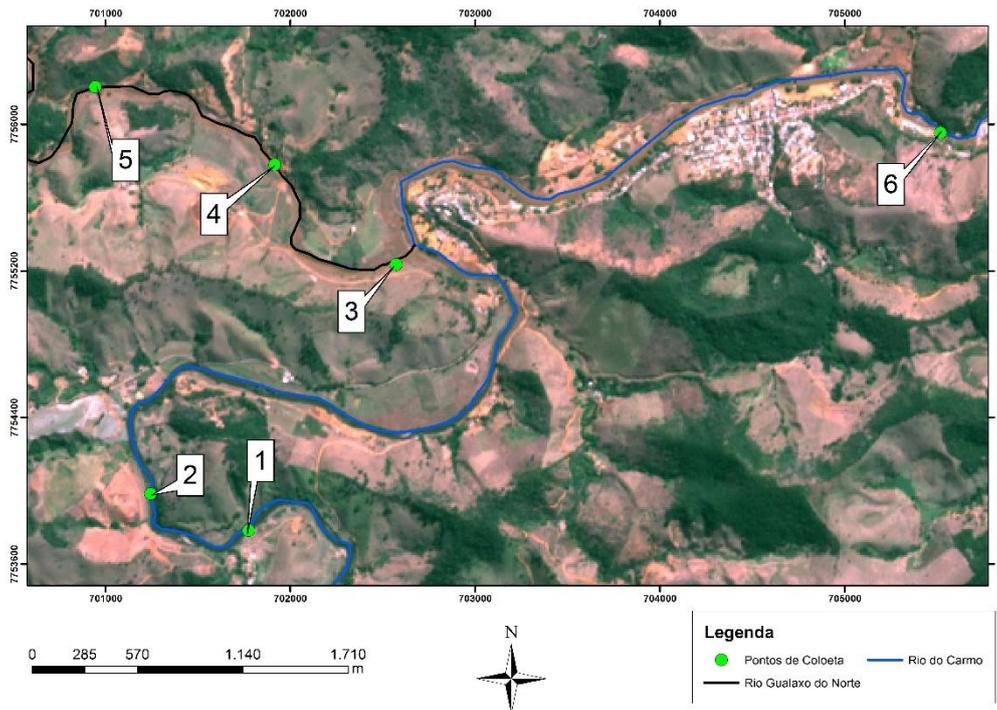


Figura 8: Espacialização dos pontos de amostragem.

A coleta foi realizada, segundo a norma NBR 9897 (ABNT, 1987). O frasco foi mergulhado rapidamente com a boca para baixo, a cerca de 15 a 30 cm abaixo da superfície da água, para evitar a introdução de contaminantes superficiais, em seguida direcionado de modo que a boca fique em sentido contrário à corrente, conforme apresentado na Figura 9.

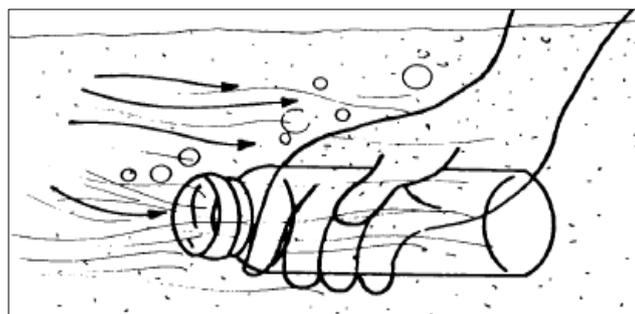


Figura 9: Esquema de como deve ser realizada a amostragem manual em águas superficiais, segundo a NBR 9898 (ABNT, 1987).

As amostras foram coletadas em seção transversal do rio, realizadas manualmente, adaptadas ao uso de um podão, para distanciar o ponto da margem. Em cada ponto foram lidas as variáveis temperatura, pH, eH, condutividade

elétrica, sólidos dissolvidos (Figura 10) e registrada a média em três leituras: na superfície mais afastada da margem, na subsuperfície mais afastada da margem e na subsuperfície próxima à margem.



Figura 10: (10.1) Demonstração de uso do aparelho multiparâmetros nas leituras de pH, sólidos dissolvidos, condutividade elétrica, temperatura e potencial redox *in loco*; (10.2) Frascos âmbar e filtragem de 50ml de cada amostra de água em seringa com filtro de membrana de celulose 0,45 µm; (10.3) Material retido nos filtros e preparado para fluorescência de raios – X.

Nos locais foram coletadas aproximadamente 200 mL em frasco âmbar (para análise de metais) e 500 mL em frasco transparente (para demais análises).

A quantidade de 200 mL do frasco polietileno escuro, foi preservada com HNO₃ subdestilado (2 gotas) e resfriada à 4°C. Com isso pode ser mantido até 6 meses, para determinação de metais totais.

Dados de pH, sólidos dissolvidos, condutividade elétrica, temperatura e potencial redox coletados *in loco*, utilizando aparelho multiparâmetros (Figura 10).

2.3 Análises físico-químicas

2.3.1. Turbidez

A turbidez indica o grau de atenuação que um feixe de luz sofre ao atravessar a água. Esta atenuação ocorre pela absorção e espalhamento da luz causada pelos sólidos em suspensão (silte, areia, argila, algas, detritos e outros). A

alta turbidez reduz a fotossíntese da vegetação enraizada submersa e das algas. Esse desenvolvimento reduzido de plantas pode, por sua vez, suprimir a produtividade de peixes. Logo, a turbidez pode influenciar nas comunidades biológicas aquáticas (IGAM, 2015c).

A determinação da turbidez e cor foram realizadas na Divisão de Água e Esgoto da Universidade Federal de Viçosa (UFV), por turbidímetro, usando método nefelométrico que envolve a comparação com soluções padrão de turbidez conhecida. As leituras podem ser realizadas em até 24 horas após a coleta, se armazenadas em local escuro (CETESB, 2011).

2.3.2. Cor

A cor da água é o nível de cor natural do corpo de água em mg Pt/L (miligramas de platina-cobalto/L). A variação da cor é conferida pela presença de matéria orgânica e matérias dissolvidos na água (HAZEN, 1896).

A cor foi determinada por aparelho color-test, realizadas na Divisão de Água e Esgoto, da UFV.

2.3.3. Sedimentos em suspensão

As amostras foram submetidas a filtração da água e sedimentos para se determinar o conteúdo do material de suspensão. Foi utilizado sistema de filtração com seringa, em que foram filtrados 20 ml, com filtros de acetato de celulose com porosidade de 0,45 µm. Posteriormente esses filtros foram colocados em estufa com temperatura de 100 °C por um período de 1 hora, de forma a eliminar toda a água existente no filtro (CETESB, 2011). O material remanescente da filtração foi analisado utilizando o espectrometro de termofluorescência de raios -X.

2.3.4. Metais dissolvidos

As amostras destinadas a determinação de metais pesados (Tabela 2) foram armazenadas em frascos de polietileno cor âmbar previamente limpos e lavados em solução ácida. Após a coleta as amostras foram acidificadas com HNO₃ uma a uma e refrigeradas a 4 °C conforme CETESB (2011).

Foram separados 9 ml de cada amostra que receberam 2 ml de HNO₃ para digestão em microondas, utilizando o *método Microwave assisted acid digestion of aqueous samples and extracts* (US - EPA 3015A). Este processo prepara a solução

até a análise dos teores totais dos metais pesados Cr, Cu, Mn, Ni, Fe, Cd, Pb, no ICP OES (espectrometria de emissão atômica com plasma acoplado indutivamente), conforme Smichowski; Marrero; e Gómez (2005) fizeram para análises de materiais poluentes no ambiente.

Tabela 2: Características Físico-químicas da água analisadas no estudo.

Características físico-químicas

Temperatura

Ph = Potencial hidrogeniônico

Eh = Potencial Oxirredução

Condutividade

Sólidos dissolvidos

Turbidez

Cor

Cr = Cromo*

Cu = Cobre*

Mn = Manganês*

Fe = Ferro*

Ni = Níquel*

Cd = Cádmio*

Pb = Chumbo*

No presente trabalho a localização dos pontos de coletas foi realizada de forma a retratar três situações distintas nos rios estudados. Os pontos 1 e 2 foram realizados no rio do Carmo, antes do desague do rio Gualaxo do Norte, ou seja, antes de receber os rejeitos oriundos do rompimento da barragem do Fundão. Nessa condição servem como testemunhas e mesmo como comparativo para avaliar o efeito antes do lançamento dos rejeitos. Os pontos 3 a 5 foram locados no leito regular do rio Gualaxo do Norte, antes da sua foz no rio do Carmo, em situação de extrema contaminação. O ponto 6 é em área urbana de Barra Longa, e sofre o efeito de diluição do rio do Carmo.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Turbidez, Cor e Ferro

O volume de chuvas tem influência direta na vazão e na qualidade das águas dos rios. Porém a relação entre a precipitação e a qualidade da água é algo muito complexo, pois dependem de diversos fatores, como o uso e cobertura do solo nas áreas próximas, o relevo, a intensidade da chuva, o tipo de solo e outros fatores que podem influenciar a taxa de escoamento superficial. Em função da entrada de

água pluvial nos rios, pode aumentar a turbidez e o teor de matéria orgânica e alterar a cor das águas (FRITZSONS et al., 2003).

Na região de estudo a precipitação média é de 1552 mm e no período considerado (abril a setembro) a média histórica é de 165,5 mm (Tabela 3) enquanto que a média de chuva no período de abril a setembro de 2016 foi de 224,5 mm, muito acima da normal (INMET, 2016). Vale ressaltar, entretanto, a variabilidade temporal da quantidade de chuvas quando comparada com os valores normais, com o mês de julho que praticamente não apresentou nenhuma chuva, e o mês de junho, que foi extremamente chuvoso quando comparado com a precipitação normal.

Tabela 3. Precipitação no período de coleta dos dados na região de estudo

<i>Mês</i>	Precipitação (mm)		
	10 dias*	2016**	Normais***
Abril	0,3	43,4	55,8
Mai	2,8	3,3	28,8
Junho	4,4	74,4	11,5
Julho	0,3	0,3	15,3
Agosto	0,0	9,2	14,8
Setembro	2,3	93,9	39,3
		224,5	165,5

* Chuva acumulada 10 dias antes da coleta. **Dados da estação meteorológica automática localizada no município de Acaiaca (MG). Fonte: INMET (2016). *** Normal climatológica de 1961-1990 - Fonte: Instituto Nacional de Meteorologia.

Na Tabela 4 e na Figura 11, nota-se que os maiores valores de turbidez referem-se aos pontos (3 a 5) localizados no rio Gualaxo do Norte, variando de 145 a 635 NTU, e que o coeficiente de variação foi elevado para todos os pontos, alterados pela precipitação, variando apenas a intensidade em função do volume de rejeito depositado. Esse resultado permite levantar a hipótese de que ocorre uma estabilização nos valores de turbidez, pois a área afetada está apresentando a mesma variação da área testemunha.

Os valores observados por IGAM (2016b) para o período logo após o rompimento da barragem em local próximo ao deste estudo, foi de 35.200 NTU, porém esse mesmo autor ressalta que ao longo do tempo os valores de turbidez vem reduzindo gradativamente chegando a valores padrões para água de Classe 2 (≤ 100 NTU). Antes da confluência do rio Gualaxo do Norte com o rio do Carmo, os

valores apresentaram médias com valores 3 vezes maior que o limite permitido e, mesmo no período seco, o valor mínimo não foi abaixo de 100 NTU. Entretanto, logo após sua confluência com o rio do Carmo, a média reduz para 88 NTU, ou seja, já passa para padrão classe 2. A influência geoquímica natural da água do Rio do Carmo apresentada nos pontos 1 e 2, ajuda na diluição da carga de materiais que provém do Rio Gualaxo do Norte (pontos 3, 4 e 5), após a confluência de ambos os rios e sequência do Rio do Carmo (ponto 6), na cidade de Barra Longa.

Além de toda a destruição, todo esse material irá fornecer, por tempo indeterminado, uma grande e variada quantidade de sedimentos para esses rios, cujo grau de intensidade estará relacionado diretamente com o volume de precipitação e o tipo de intervenções que se irão realizar nas áreas afetadas. Porém, dificilmente todo o volume de rejeitos será retirado.

A turbidez foi mais intensa no mês de abril, final do período chuvoso, com um pequeno incremento no mês de julho, oriundo de um evento chuvoso atípico ocorrido no final do mês anterior, pode ser observada na figura 8. Considerando apenas a média dos valores dos pontos 3 a 5, que correspondem ao locais mais influenciados pela pluma de rejeitos, foi determinado o coeficiente de determinação (R^2) dos valores de turbidez em relação à precipitação, com resultado de 0,21 (Figura 11), ou seja, nesse caso, a influência da precipitação na turbidez média foi baixa. Os volumes de precipitação dez dias antes da data de coleta também não explicam adequadamente essa relação com a chuva. Estações de coleta de precipitação devem ser instaladas nos pontos de coletas em estudos posteriores para melhorar esta relação.

Tabela 4. Resumo estatístico dos resultados analíticos

Média														
Ponto	Temperatura	pH	eH	CE	SD	Turbidez	Cor	Cr	Cu	Mn	Fe	Ni	Cd	Pb
	°C			uS.cm ⁻¹	mg.L ⁻¹	NTU	Mg.Pt.L ⁻¹	----- mg.L ⁻¹ -----						
1	21,3	6,2	172,0	0,100	0,042	7,5	22,5	0,002	0,010	0,059	0,127	0,004	0,003	0,040
2	21,6	6,2	191,3	0,085	0,040	7,0	22,2	0,005	0,010	0,051	0,138	0,008	0,005	0,043
3	22,2	6,1	198,0	0,080	0,042	360,2	370,2	0,007	0,021	0,262	2,595	0,009	0,005	0,040
4	22,0	6,1	215,3	0,075	0,038	316,3	341,7	0,003	0,024	0,250	3,253	0,008	0,005	0,041
5	21,8	6,1	230,8	0,075	0,038	328,7	344,3	0,004	0,022	0,260	3,140	0,014	0,007	0,033
6	23,0	6,1	225,5	0,088	0,043	88,8	96,4	0,004	0,020	0,091	0,481	0,010	0,005	0,040
Desvio Padrão														
1	2,68	1,01	54,35	0,04	0,01	4,38	10,63	0,004	0,002	0,031	0,095	0,006	0,003	0,010
2	2,64	0,91	53,26	0,02	0,01	3,55	9,82	0,007	0,001	0,029	0,144	0,007	0,003	0,015
3	2,86	0,84	42,92	0,01	0,00	150,49	163,19	0,008	0,005	0,130	1,436	0,010	0,004	0,013
4	3,41	0,82	62,63	0,01	0,00	184,61	230,12	0,005	0,007	0,156	2,254	0,008	0,003	0,012
5	2,60	0,87	68,76	0,01	0,00	142,47	158,74	0,004	0,005	0,141	3,216	0,007	0,002	0,014
6	2,00	0,90	74,01	0,03	0,01	46,32	44,92	0,003	0,005	0,045	0,284	0,011	0,004	0,007
Coeficiente de variação														
1	0,13	0,16	0,32	0,42	0,28	0,59	0,47	1,69	0,21	0,53	0,75	1,39	0,99	0,25
2	0,12	0,15	0,28	0,23	0,16	0,51	0,44	1,59	0,11	0,57	1,05	0,94	0,69	0,35
3	0,13	0,14	0,22	0,16	0,10	0,42	0,44	1,11	0,24	0,50	0,55	1,11	0,77	0,32
4	0,15	0,13	0,29	0,07	0,11	0,58	0,67	1,81	0,29	0,62	0,69	0,97	0,65	0,30
5	0,12	0,14	0,30	0,11	0,11	0,43	0,46	1,07	0,21	0,54	1,02	0,50	0,35	0,43
6	0,09	0,15	0,33	0,29	0,32	0,52	0,47	0,77	0,25	0,49	0,59	1,08	0,82	0,17

Tabela 4. Resumo estatístico dos resultados analíticos (continuação)

Valores máximos														
Ponto	Temperatura	pH	eH	CE	SD	Turbidez	Cor	Cr	Cu	Mn	Fe	Ni	Cd	Pb
	°C			uS.cm ⁻¹	mg.L ⁻¹	NTU	mg Pt.L ⁻¹	----- mg.L ⁻¹ -----						
1	24,5	7,4	248,0	0,2	0,1	15,1	36,5	0,010	0,012	0,113	0,240	0,013	0,007	0,050
2	25,0	6,9	273,0	0,1	0,1	13,4	34,0	0,016	0,012	0,091	0,372	0,019	0,010	0,066
3	26,0	6,9	247,0	0,1	0,1	580,0	628,0	0,018	0,025	0,441	4,683	0,026	0,010	0,050
4	27,0	7,0	300,0	0,1	0,0	635,0	773,0	0,013	0,033	0,464	7,234	0,020	0,009	0,056
5	26,0	7,1	306,0	0,1	0,0	550,0	618,0	0,009	0,026	0,435	9,126	0,023	0,009	0,055
6	25,0	7,1	320,0	0,1	0,1	168,0	175,0	0,008	0,026	0,166	0,752	0,023	0,010	0,047
Valores mínimos														
1	18,0	4,5	111,0	0,1	0,0	2,4	9,5	0,000	0,006	0,025	0,000	0,000	0,000	0,024
2	18,0	4,6	132,0	0,1	0,0	2,8	9,5	0,000	0,009	0,025	0,000	0,000	0,001	0,030
3	18,0	4,7	150,0	0,1	0,0	171,0	172,0	0,000	0,011	0,104	0,606	0,000	0,001	0,020
4	18,0	4,9	154,0	0,1	0,0	145,0	139,0	0,000	0,012	0,111	1,325	0,000	0,001	0,022
5	18,5	4,8	150,0	0,1	0,0	155,0	168,0	0,000	0,013	0,104	0,000	0,006	0,003	0,011
6	20,0	4,7	149,0	0,1	0,0	35,0	55,0	0,000	0,011	0,033	0,067	0,000	0,001	0,031

na PCH Furquim Barramento, no município de Mariana (MG), distante cerca de 17 km dos pontos de coleta. Entretanto, são vários os autores que avaliaram os efeitos da precipitação no comportamento da turbidez nos rios (FRAGA et al, 2012; SILVA et al., 2008; OLIVEIRA et al., 2014). Oliveira et al. (2014) estudando a correlação entre a precipitação e a turbidez em rios no sul do Amapá encontraram valores de 0,87.

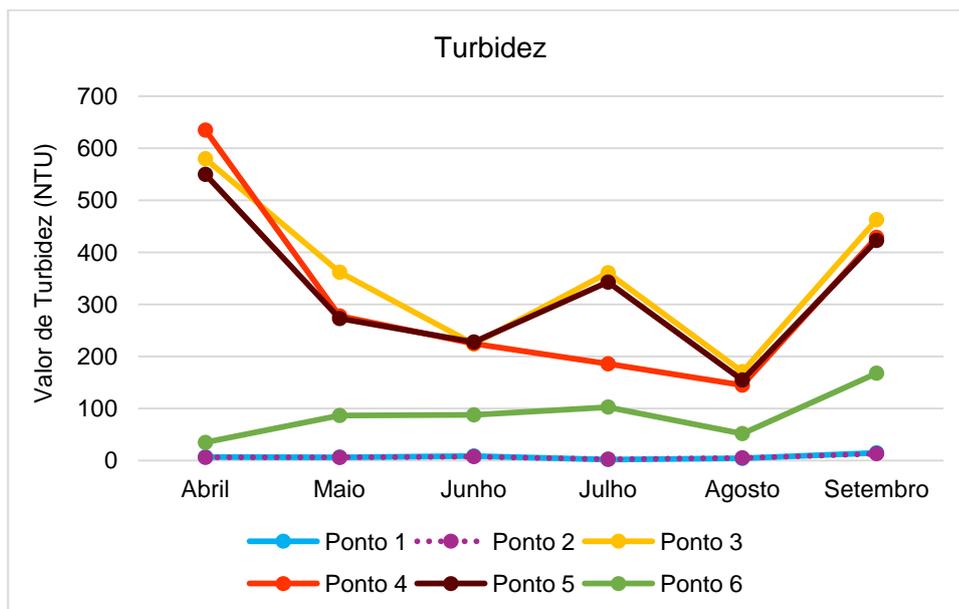


Figura 11: Dinâmica da turbidez da água nos diferentes pontos no período estudado.

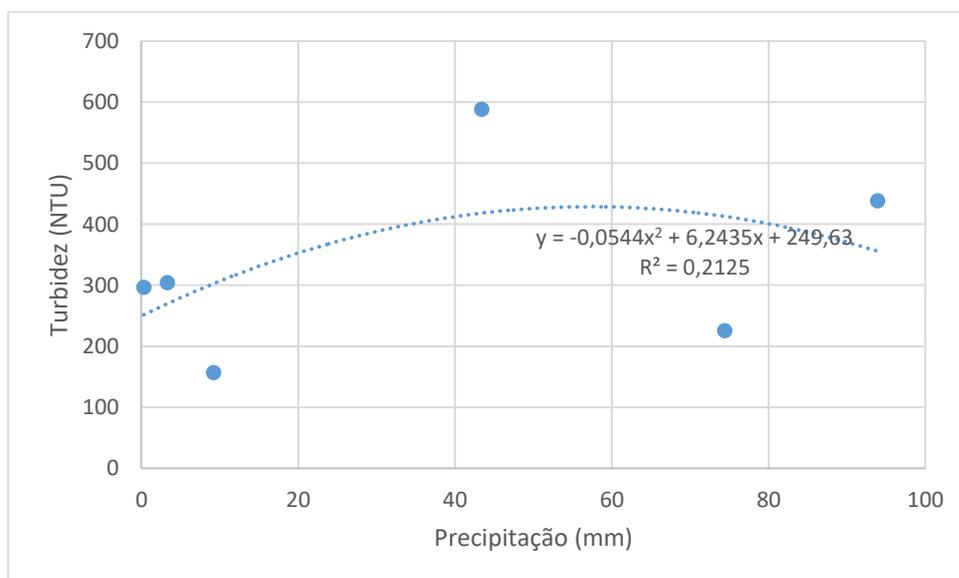


Figura 12. Coeficiente de determinação da turbidez em relação à precipitação.

Na Tabela 5 observa-se altos coeficientes de correlação linear de Pearson(r) entre os atributos estudados. Todos os parâmetros de qualidade da água selecionados (turbidez, cor e teor de ferro) apresentaram elevadas correlações positivas entre si, o que indica que estão sujeitas às mesmas variações, ou seja, todos apresentam comportamento semelhantes, como pode ser observado nas figuras 13 e 14, as quais apresentam o mesmo padrão da correspondente à turbidez, da figura 12. A explicação dessa elevada correlação é devido ao tipo de rejeito lançado nessas águas, com elevado teor de ferro, o que, segundo Azevedo (2006), contribui para o aumento da cor na água e aumento da turbidez.

Tabela 5: Correlação entre os elementos e Turbidez, Cor e Ferro.

<i>Variáveis correlacionadas</i>	<i>Turbidez</i>	<i>Cor</i>	<i>Ferro</i>
Temperatura	0,21	0,19	0,09
pH	-0,73	-0,72	-0,67
eH	0,54	0,53	0,56
Condutividade elétrica	-0,83	-0,83	-0,86
Sólidos Dissolvidos	-0,46	-0,49	-0,64
Turbidez	1	0,99	0,97
Cor	0,99	1	0,98
Fe	0,97	0,98	1
Cr	0,35	0,32	0,14
Cu	0,88	0,88	0,86
Mn	0,99	0,99	0,98
Ni	0,59	0,58	0,58
Cd	0,68	0,68	0,71
Pb	-0,50	-0,49	-0,52

Entretanto, outras propriedades da água também apresentaram elevadas correlações com os atributos, como o pH e a condutividade elétrica, com esse último apresentando valores em torno de 0,85. Aparentemente a pluma de rejeito não alterou o valor de pH das águas (Tabela 4), pois apresentou valores praticamente idênticos entre as áreas afetadas e não afetadas. Comportamento semelhante foi a condutividade elétrica, que com exceção do ponto 1 que apresentou valor de $0,10 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, apesar de ter sido em local não afetado pela pluma de rejeito. Esses dados confirmam a observação de IBAMA (2015a) que tratou os rejeitos como material a princípio inerte conforme norma NBR 10.004, porém com potencial para ocasionar desestruturação química.

Ainda mais elevadas foram as correlações dos metais pesados com os atributos, com destaque para o manganês e o cobre. O primeiro é frequentemente encontrado em associação com o ferro e, segundo Sampaio (2003), é normalmente encontrado em águas superficiais em baixas concentrações, algo próximo de $\sim 0,2 \text{ mg.L}^{-1}$, valor esse muito próximo do encontrado neste estudo, que apresentou média de $0,162 \text{ mg.L}^{-1}$.

Os elementos como Mn, Cu, Cd e Ni ligam-se a óxidos de ferro (Rodrigues et al., 2015), o que influencia na distribuição destes materiais e consequentemente na correlação elevada com os parâmetros de Cor e Turbidez, já que esses são alterados pela concentração de Ferro.

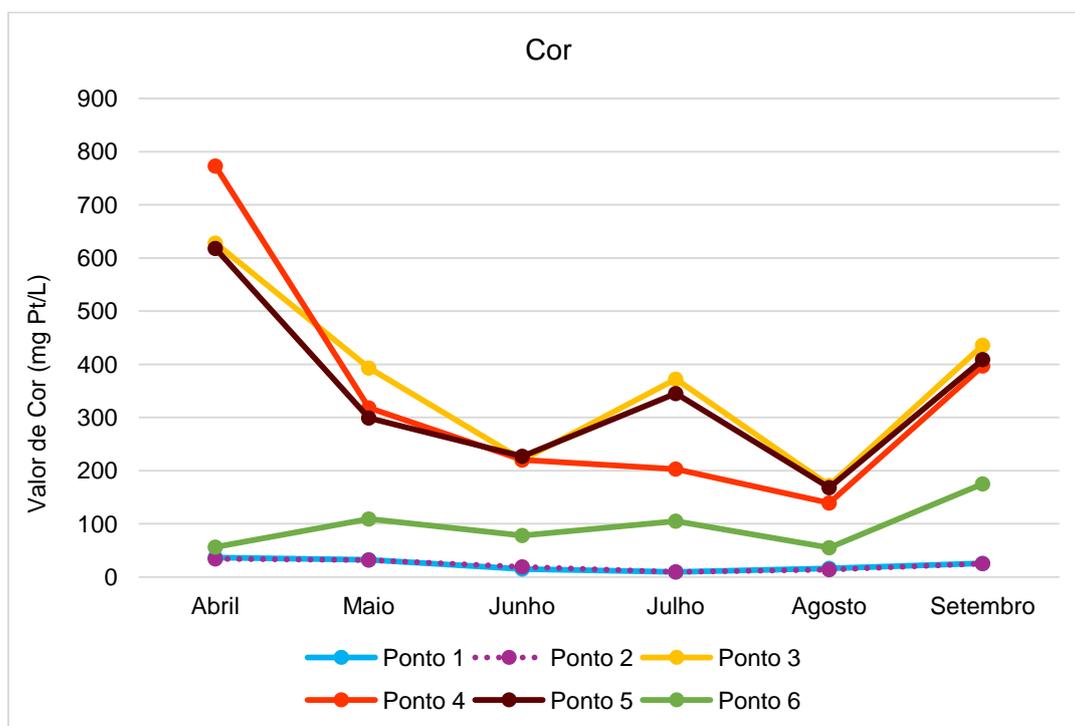


Figura 13: Dinâmica da cor da água nos pontos no período estudado.

Após o rompimento da barragem, o teor de ferro no leito do rio Gualaxo do Norte contaminado pelos rejeitos (Pontos 3, 4 e 5) apresentou seu valor máximo de 9 mg.L^{-1} (Ponto 5-mês de abril) e ausência total nos pontos 1 e 2, no mês de julho. Rodrigues et al. (2015) já tinham encontrado grande quantidade de Fe no leito principal do Rio Gualaxo do Norte em 2015, muito maior que em seus afluentes, e pode indicar que este elemento e os demais apresentados, não provêm da

geologia local e sim de escapes de depósitos de rejeitos de minérios de ferro, à cabeceira do rio.

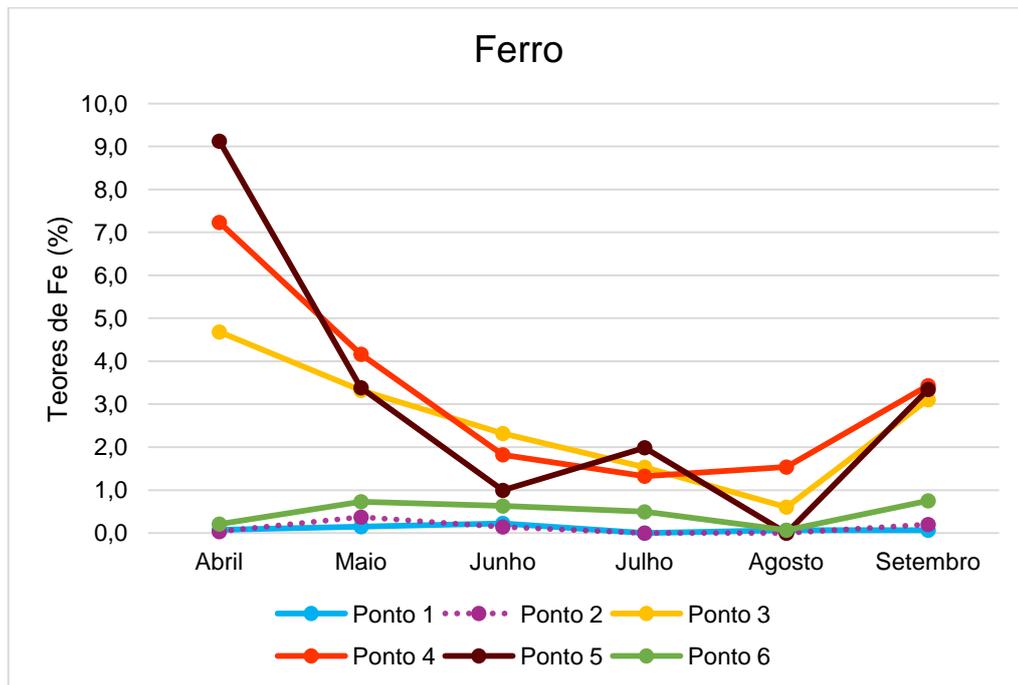


Figura 14: Dinâmica do Ferro dissolvido (Método US - EPA 3015A).

Outra situação surgida após o rompimento da barragem de Fundão é a instabilidade estrutural do material depositado no leito maior do rio Gualaxo do Norte e do Carmo, que é de fácil transporte pela água pluvial para o leito do rio (Figura 15), de difícil controle e determinação.



Figura 15: Sulcos causados pelo escoamento das águas das chuvas no talude de rejeitos.

3.2. Comparação com valores padrões

Segundo a resolução 357/05 CONAMA, na classificação das águas doces, no seu art. 42 dispõe que enquanto não haja estudos mais aprofundados, as águas doces serão consideradas “classe 2”, exceto se as condições de qualidade atuais forem melhores, o que determinará a aplicação da classe mais rigorosa correspondente.

O IGAM (2015c), classificou o Rio do Carmo, com dados da série histórica, em classe 2, com teores de Turbidez de 9 a 83 NTU, Cor igual a 10 mg Pt/L e Ferro com média de 0,16 mg/L. Nesse estudo a turbidez das amostras do Rio do Carmo nos pontos sem contaminação pela pluma de rejeitos, esteve entre 2,4 e 15,1 NTU, a cor entre 9,5 e 36,5 e ferro de média 0,14 mg.L⁻¹, o que mostra que está dentro do padrão da resolução para classe 2.

A grande quantidade de rejeitos dispostos nas margens e fundo dos rios alteraram os teores dos elementos no rio Gualaxo do Norte, para turbidez, cor, Mn, Fe, Cd, Pb, acima do permitido para a classe 2 de águas doces da resolução CONAMA 357/05, como mostra a Tabela 6. Outra alteração é percebida para pH, nos meses mais secos, onde diminui muito e sai da faixa de classificação pra Classe 2.

Tabela 6: Comparação dos resultados para o Rio Gualaxo do Norte

Características físico-químicas	“Classe 2” CONAMA 357/05	Rio Gualaxo do Norte/2016						
		21/04	24/05	20/06	07/07	10/08	12/09	
Temperatura da água <i>in loco</i> °C	Sem limites padrões	26,33	24,00	18,17	21,33	21,33	22,00	
pH <i>in loco</i>	6,0 a 9,0	6,50	6,90	4,80	5,87	5,87	7,00	
eH <i>in loco</i>	Sem limites padrões	243,3	273,0	274,3	183,0	183,0	161,0	
Condutividade mS/cm <i>in loco</i>	Sem limites padrões	0,08	0,07	0,07	0,09	0,09	0,07	
Sólidos Dissolvidos mg/L <i>in loco</i>	500	400	370	400	400	400	400	
Turbidez NTU	100	588,3	304,3	225,6	296,6	296,6	438,3	
Cor mg Pt/L	75	673,0	336,6	222,3	306,6	306,6	414,0	
Cr mg/L	0,05	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	
Cu mg/L	0,09	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	
Mn mg/L	0,10	0,43	0,22	0,14	0,22	0,22	0,43	
Fe mg/L	0,30	7,01	3,62	1,71	1,62	1,62	3,29	
Ni mg/L	0,025	0,003	0,004	0,011	0,009	0,009	0,021	
Cd mg/L	0,001	0,002	0,004	0,005	0,006	0,006	0,009	
Pb mg/L	0,01	0,02	0,03	0,04	0,04	0,04	0,05	

Ao observar os resultados do rio do Carmo à jusante da foz do Rio Gualaxo, onde houve a mistura das águas dos dois rios, verificamos a diminuição para os valores de turbidez, cor, Mn, Fe, Cd, Pb.

Os valores para a água contaminada pelos rejeitos do rompimento da barragem da Samarco, resultaram em valores muito acima do estabelecido na classificação recomendada dos rios em “água doce de classe 2” pela resolução 357 do CONAMA.

Também está com os valores acima dos estabelecidos na Resolução 357 para “água doce de classe 3: pode ser destinada ao abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional ou avançado” com valores de até 100 NTU de turbidez e cor até 75 mg Pt/L (CONAMA, 2005). Nos resultados deste trabalho, a água do leite contaminado chegou a apresentar o valor de 635 NTU e cor de 776 Pt/L, no ponto 4 para o mês de abril de 2016.

Tabela 7: Comparação dos resultados para o Rio do Carmo à jusante

Características físico-químicas	“Classe 2 “ CONAMA 357/05	Rio do Carmo à jusante/2016					
		21/04	24/05	20/06	07/07	10/08	12/09
Temperatura da água <i>in loco</i> °C	Sem limites padrões	25	24	20	24	21	24
pH <i>in loco</i>	6,0 a 9,0	6,8	6,7	4,7	5,9	5,6	7,1
eH <i>in loco</i>	Sem limites padrões	255	294	320	180	149	155
Condutividade mS/cm <i>in loco</i>	Sem limites padrões	0,08	0,07	0,08	0,14	0,08	0,08
Sólidos Dissolvidos mg/L <i>in loco</i>	500	400	400	400	400	400	400
Turbidez NTU	100	35	87	88	103	52	168
Cor mg Pt/L	75	56	109	78	105	55	175
Cr mg/L	0,05	0,000	0,005	0,004	0,001	0,008	0,007
Cu mg/L	0,09	0,020	0,026	0,020	0,020	0,011	0,023
Mn mg/L	0,10	0,03	0,10	0,09	0,10	0,06	0,17
Fe mg/L	0,30	0,21	0,73	0,63	0,50	0,07	0,75
Ni mg/L	0,025	0,000	0,018	0,000	0,001	0,017	0,023
Cd mg/L	0,001	0,001	0,008	0,001	0,002	0,007	0,010
Pb mg/L	0,01	0,04	0,04	0,05	0,04	0,03	0,05

No ponto 6, com a mistura das águas dos dois rios, alguns elementos, como o Fe, ainda não se encontram dentro dos padrões da resolução, para os meses mais chuvosos, mas houve uma considerável diminuição.

Observa-se também um pequeno aumento do Pb, o qual possui correlação negativa com cor, turbidez e ferro, o que se confirma na tabela 8, onde temos estes

atributos com valores ainda mais baixos e dentro do padrão e o Pb aumenta seu valor, o único a permanecer fora dos padrões para classe 2. Esses valores podem estar relacionados à presença natural de chumbo de cerca de 15 mg kg⁻¹ nos solos naturais sem manejo antrópico (KABATA-PENDIAS & PENDIAS, 2011), já que ele está presente também em altas concentrações nas águas do Rio do Carmo à montante, livre da contaminação pelos rejeitos.

Tabela 8: Comparação dos resultados para o Rio do Carmo à montante

Características físico-químicas	CONAMA 357/05	do Carmo à montante					
		21/04	24/05	20/06	07/07	10/08	12/09
Temperatura da água <i>in loco</i> °C	Sem limites padrões	24,7	23,7	18	19,5	20	22,5
pH <i>in loco</i>	6,0 a 9,0	6,55	7,15	4,55	5,6	6,45	6,80
eH <i>in loco</i>	Sem limites padrões	168	228	235	202	132	124
Condutividade mS/cm <i>in loco</i>	Sem limites padrões	0,12	0,08	0,05	0,13	0,08	0,09
Sólidos Dissolvidos mg/L <i>in loco</i>	500	350	350	350	350	450	400
Turbidez NTU	100	7	6	8	3	5	14
Cor mg Pt/L	75	35	32	17	10	15	25
Cr mg/L	0,05	0	0	0	0	0,01	0,01
Cu mg/L	0,09	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Mn mg/L	0,10	0,03	0,08	0,04	0,03	0,05	0,10
Fe mg/L	0,30	0,06	0,26	0,19	0,00	0,05	0,24
Ni mg/L	0,025	0,005	0	0	0,010	0,010	0,010
Cd mg/L	0,001	0,002	0,001	0,001	0,005	0,006	0,010
Pb mg/L	0,01	0,04	0,03	0,04	0,05	0,04	0,03

Os valores de turbidez e cor estão normais para o Rio do Carmo antes da foz do Gualaxo do Norte (entre 2,4 e 15,1 NTU; 9,5 a 36,5 cor aparente) mostram uma alternativa de captação de água para tratamento e distribuição para a população, bem como outros afluentes à montante de seus deságues.

Os demais elementos não possuem estudos suficientes sobre sua presença na água. Mesmo a Resolução 357 (CONAMA, 2005) em suas disposições afirma que as possíveis interações entre as substâncias e a presença de contaminantes não listados nesta Resolução, passíveis de causar danos aos seres vivos, deverão ser investigadas utilizando ensaios ecotoxicológicos, toxicológicos, ou outros métodos cientificamente reconhecidos. Afirma ainda, que o poder público poderá, a qualquer momento, acrescentar outras condições e padrões de qualidade para um determinado corpo d'água, ou torná-los mais restritivos, tendo em vista as condições locais, mediante fundamentação técnica.

4. CONCLUSÕES

Os valores das características físico-químicas das águas dos rios, em geral, aumentaram com o colapso da barragem de forma muito intensa. Entretanto, neste estudo foi observado uma redução do nível de turbidez e teor de ferro, além de alterações na cor, o que era interrompido durante as precipitações, provavelmente devido ao revolvimento do leito e carreamento de material das margens.

Os teores de turbidez e cor estão diretamente relacionados aos teores de ferro dissolvido e os elementos cromo, cobre, níquel, cádmio e manganês estão fortemente correlacionados com o ferro, logo, que também influencia nos resultados da cor e turbidez.

O rio do Carmo possui teores de turbidez, cor e ferro dentro dos limites para classe 2 e com isso auxilia na diluição dos poluentes do rio Gualaxo do Norte após a confluência desses rios.

O rio Gualaxo do Norte possui valores de contaminação muitos acima dos estabelecidos, mesmo para classe 3, sendo necessário conhecer melhor a presença de contaminantes não citados na resolução 35705, bem como criar um sistema de classificação especial de acordo com as características das águas.

CAPÍTULO II – AVALIAÇÃO DE RESPOSTA ESPECTRAL DA ÁGUA CONTAMINADA POR PLUMA DE REJEITOS DE MINERAÇÃO UTILIZANDO IMAGENS LANDSAT 8 E SENTINEL 2

RESUMO

Informações sobre características da água da superfície terrestre e seus constituintes podem ser obtidas através de imagens orbitais. Para isso foram desenvolvidos uma série de índices espectrais da água. Este trabalho avaliou o potencial de imagens orbitais disponibilizadas gratuitamente em monitorar as características das águas contaminada pela lama de rejeitos do rompimento da barragem de Fundão, Mariana MG. Através do Random Forest e Regressão Linear, no software R, avaliou-se o melhor índice espectral, segundo pesquisa em literatura, e as bandas Landsat 8 e Sentinel 2A separadamente, através da correlação entre a reflectância registrada nas imagens com os respectivos teores de metais, cor e turbidez e demais variáveis águas contaminadas dos rios poluídos pelo rejeito de mineração. O Random Forest obteve melhores resultados em relação a frequência da seleção das covariáveis para explicar os atributos físico-químicos. Assim, as melhores correlações foram, respectivamente, com as Bandas 5 e 8 do satélite Sentinel 2A, com o Índice Indicador de Cursos d'Água – IIA a partir de dados Sentinel-2A, NDWI a partir de Sentinel-2A, AWEIsh a partir de Sentinel-2A e Banda 5 do satélite Landsat 8. Com a regressão linear pode-se gerar para cada atributo físico-químico as equações que explicam a correlação com as características espectrais. Os atributos que mais interessam ao estudo, cor, turbidez, ferro, por possuírem alta correlação entre si e os demais elementos, apresentaram os mesmos resultados para o RF, com a adição das bandas 8ª do Sentinel 2 A e o índice MNDWI a partir de Landsat 8. Concluiu-se que o Satélite Sentinel possui as bandas que expressam melhor as características estudadas e com a disponibilidade gratuita e em alta resolução temporal e espacial, do Satélite Sentinel- 2A, sugere-se o uso dos índices espectrais de água para estimar e monitorar as características físico-químicas nas águas dos rios afetadas pelo rompimento da barragem de Fundão, bem como superfícies com características espectrais semelhantes.

ABSTRACT

Information about water characteristics of the Earth's surface and its constituents can be obtained through orbital images. For this, a series of spectral indices of water were developed. This work evaluated the potential of freely available orbital images to monitor the water characteristics contaminated by tailings dam rupture of Fundão dam, Mariana-MG. Using the Random Forest and Linear Regression, software R, the best spectral index, according to literature research, and the bands Landsat-8 and Sentinel-2A was evaluated separately, through the correlation between the reflectance recorded in the images with the respective levels of Metals, color and turbidity and other variables contaminated waters of the rivers polluted by the mining tailings. Random Forest obtained better results in relation to the frequency of selection of covariates to explain physical-chemical attributes. So, the best correlations were, respectively, Band 8 of Sentinel-2A, Band 5 of Sentinel-2A, Index of Watercourses – IIA from Sentinel-2A, NDWI from Sentinel-2A, AWEIsh from Sentinel-2A and Band 5 of the Landsat-8. With linear regression one can generate for each physical-chemical attribute the equations that explain the correlation with the spectral characteristics. The attributes that most interest the study, color, turbidity, iron, because they have a high correlation between themselves and the other elements, presented the same results for RF, with the addition of Band 8a of Sentinel-2A and the index MNDWI from Landsat-8. It was concluded that the Sentinel Satellite has the bands that best express the characteristics studied and with the free availability and in high temporal and spatial resolution of the Sentinel-2A Satellite, it is suggested the use of the spectral water indexes to estimate and to monitor the physico-chemical characteristics in the waters of the rivers affected by the rupture of the Fundão dam, as well as surfaces with similar spectral characteristics.

1. INTRODUÇÃO

A distribuição espacial de parâmetros qualitativos dos corpos de água de superfície tem grande significado para compreensão da Hidrologia e Gestão de Recursos Hídricos. As imagens orbitais podem ser utilizadas para estudo e monitoramento da qualidade das águas dos corpos hídricos de superfície e são substancialmente diferentes das medições in situ convencionais porque os dados geram informação quase que em tempo real, além de ser possível verificar a dinâmica do seu comportamento e apresentar um menor custo (CHEN et al., 2004).

A água tem a característica de refletir pouca da energia luminosa incidida e o seu espectro da radiação refletida ocupa em geral a faixa de comprimentos de onda entre 400-900nm, o que equivale à faixa do visível e o infravermelho próximo. Corpos d'água mais puros serão mais evidentes pela característica da baixa reflectância (JENSEN, 2009) e somente a parte visível da radiação eletromagnética pode fornecer informações sobre seus constituintes. As exceções são com águas com altos teores de sedimentos em suspensão e matéria orgânica (BREZONICK et al. 2015). O sensoriamento remoto para monitoramento da qualidade da água foi iniciado nos anos 1970 (RITCHIE, SCHIEBE & MCHENRY, 1976 apud EIPHANIO, 2011), quando foi desenvolvida uma equação geral de abordagem empírica para a estimativa de sedimentos em suspensão.

O desastre ocorrido no Brasil com o rompimento de uma barragem de rejeitos de mineração, no município de Mariana, estado de Minas Gerais, requer contínuo controle da situação das águas dos rios atingidos. Nesse contexto, as ferramentas disponíveis pela área do sensoriamento remoto podem contribuir de maneira efetiva no processo de monitoramento, fornecendo elementos capazes de gerar dados quantitativos e qualitativos dos rios afetados pelo rompimento da barragem a partir da identificação das relações existentes entre a resposta espectral contida nas imagens orbitais e valores de atributos obtidos por análises físico-química das águas contaminadas. Técnicas de monitoramento espacial nas últimas décadas tem a capacidade de identificar como elementos ligados ao sedimento viajam em rios contaminados (Macklin et al., 2006).

Vários métodos na área do sensoriamento remoto incluindo uso de banda única, classificação não supervisionada e supervisionada e índices espectrais de água foram desenvolvidos a fim de extrair informações sobre a qualidade da

água. Dentre eles, o método do índice espectral é um tipo de método confiável, porque é eficiente e tem baixo custo computacional (RYU; WON; MIN, 2002).

O objetivo deste capítulo foi avaliar o potencial de imagens orbitais e encontrar o melhor índice espectral para estimar e monitorar as características físico-químicas nas águas dos rios afetadas pelo rompimento da barragem de Fundão através da correlação entre a reflectância registrada nas imagens do Landsat-8 e Sentinel-2 com as características físico-químicas das águas contaminadas pelos rejeitos de mineração.

2. REVISÃO DE LITERATURA

As estimativas de componentes da água por meio de imagens orbitais são elaboradas, normalmente, por relações empíricas entre as bandas do sensor e dados *in situ*. Essas relações dependem das características dos componentes e da faixa espectral do sensor (MONTANHER et al., 2014). Entretanto, há limitações metodológicas para estas estimativas, como por exemplo, a discriminação dos espectros dos componentes.

Montanher & Souza Filho (2011) observaram que mensurações *in situ* e de laboratório demonstraram que o brilho da superfície da água é afetado pelos tipos de sedimentos, textura, cor, ângulo de visada do sensor e ângulos solares, e profundidade de água.

Sedimentos em suspensão são dos poluentes mais comuns nas águas de superfície, o aumento da concentração promove um aumento da radiância nas regiões do vermelho e infravermelho próximo do espectro eletromagnético. Porém, segundo Montanher & Souza Filho (2011), esta relação não é linear, conforme aumentam os valores de concentração, há uma maior resposta para baixas concentrações, enquanto que para altas concentrações a resposta tende a saturar-se. Por isso, uma alternativa é analisar os componentes suspensos e dissolvidos na água e sua correlação com a resposta espectral por um método não linear.

Fassoni-Andrade (2015), em estudo da Laguna dos Patos, RS, Brasil, concluiu que ocorria uma ressuspensão, em que os sedimentos siltosos no corpo da laguna eram ressuspensos pela ação dos ventos em períodos de baixa descarga (verão), já no período com alta descarga fluvial, sedimentos finos (argilosos e siltosos) predominam na laguna (inverno). Assim, a autora verificou que quando a reflectância é influenciada pelo tipo de sedimentos em suspensão, as

maiores reflectâncias no verão podem estar relacionadas não com as maiores concentrações, mas ao tipo de sedimentos em relação ao processo dominante.

Segundo Schroeter & Gläßer (2011), as matérias inorgânicas e orgânicas dissolvidas são opticamente ativas se elas têm um diâmetro superior a 0,45 μm , no visível estes solutos são susceptíveis absorção de luz, solutos inorgânicos são especialmente importantes em lagos de mineração, pois absorvem radiação e incluem o grupo de íons de metal (por exemplo Fe, Mn, Cu, Ni), em elevada concentração de íons de ferro.

Usali e Ismail (2010) afirmam que estudos com diferentes tipos de plataforma de satélite, como Landsat, SPOT, IRS, *Coastal Zone Color Scanner* (CZCS) e marítimas de amplo campo de visada como o Sensor (SeaWiFS) tem mostrado uma significativa relação entre matéria suspensa e reflectância em bandas combinadas ou mesmo uma única banda. Nos estudos *in situ*, o comprimento de onda entre 700 e 800 nm foram os mais úteis para determinar matéria em suspensão na água de superfície. A absorção de radiação por sedimento em suspensão é geralmente muito menor do que a de clorofila, mas a dispersão é muito maior. Ritchie, Zimba & Everitt (2003) também confirmaram que esse intervalo do espectro é o mais eficiente na determinação de sólidos suspensos e turbidez em águas superficiais. Descreveu a relação entre turbidez e sólidos suspensos e a reflectância com bandas do Landsat TM. Alguns estudos confirmaram que a turbidez pode ser representada combinando visível, infravermelho médio e infravermelho (AKBAR; HASSAN; ACHARI, 2010).

Montanher & Souza Filho (2011) agruparam o comportamento espectral dos dados dos pontos de amostragem de água coletados em rios do estado do Paraná, Brasil, em duas classes distintas: Predominância de sedimentos inorgânicos em suspensão, e mistura entre sedimentos inorgânicos e clorofila. Isso se deu a partir do seu comportamento espectral nas imagens, levantamento bibliográfico sobre o comportamento dos componentes opticamente ativos e avaliação visual baseada na tonalidade e intensidade das cores das águas. Os autores, além disso, utilizaram nas análises de regressão as bandas 1, 2, 3 e 4 do sensor Landsat 5 TM, pois abrangem o intervalo espectral mais adequado ao estudo da qualidade da água em corpos aquáticos, na faixa de 400 a 800 nm.

O trabalho de Usali e Ismail (2010), mostrou que na pesquisa por sensoriamento remoto e técnicas de geoprocessamento, os parâmetros de

qualidade da água podem ser produzidos em forma de mapa usando um algoritmo ou modelo, por diferentes plataformas de imagens de satélite. A dinâmica espaço-temporal das características limnológicas é fundamental na interpretação destes ambientes.

No trabalho de Kabbara et al. (2008), através de resultados de uma campanha conduzida *in situ*, em comparação com dados de sensoriamento remoto simultâneas na mesma área e do Mar Mediterrâneo oriental – combinação espectral e espacial do sensor ETM Landsat 7 – através de modelos de regressão, confirmou a aplicação pretendida: mapas temáticos para as águas costeiras de Trípoli, mostrando a distribuição de parâmetros de qualidade da água.

Portanto, o uso de imagens orbitais pode contribuir para planejar algumas ações de controle para garantir que valores de turbidez e taxa de transporte de sedimentos não alterem a qualidade da água de mananciais utilizados no abastecimento da população, na agricultura, pesca, indústria e demais atividades econômicas (USALI e ISMAIL, 2010).

A partir das bandas escolhidas obtêm-se a reflectância adequada para cada parâmetro de qualidade da água. No futuro, se a equação empírica for bem-sucedida para cada parâmetro de qualidade da água, essa técnica poderá ser usada para estimativas do mesmo parâmetro em diferentes áreas sob investigação (USALI & ISMAIL, 2010).

2.1 Landsat 8

O satélite Landsat 8 é o mais recente satélite de uma série de missões de sensoriamento remoto que atuam desde 1972. Ele transporta dois sensores, a *Operational Terra Imager* (OLI) e o sensor infravermelho térmico (TIRS), o qual oferece continuidade a aquisição de dados captados pela banda 6 do TM e ETM+, a bordo das plataformas anteriores, além de incluir duas novas bandas espectrais (EMBRAPA, 2016) (Tabela 9).

O Landsat 8 foi lançado em 11 de fevereiro de 2013 e suas imagens estão disponíveis gratuitamente desde maio de 2013. Ele possui como características (KNIGHT & KVARAN, 2014):

- Resolução temporal de 16 dias;
- Resolução radiométrica de 16 bits;

- Resolução espectral de 11 bandas: as bandas de 1 a 7 e banda 9 de resolução espacial de 30 metros. A banda 8 é pancromática e tem 15m. As bandas 10 e 11 são termais, com 100 metros de resolução espacial;
- O tamanho aproximado de cada cena Landsat 8 é de 170 km².

Tabela 9: Bandas do Landsat 8 (sensor OLI).

	Bandas	Comprimento de onda	Resolução espacial (metros)
Landsat 8 (OLI)	Banda 1 – Aerosol	0.43 – 0.45	30
	Banda 2 – Azul	0.45 – 0.51	30
	Banda 3 – Verde	0.53 – 0.59	30
	Banda 4 – Vermelho	0.64 – 0.67	30
	Banda 5 – Infravermelho Próximo (NIR)	0.85 – 0.88	30
	Banda 6 – SWIR 1	1.57 – 1.65	30
	Banda 7 – SWIR 2	2.11 – 2.29	30
	Band 8 – Pancromática	0.50 – 0.68	15
	Band 9 – Cirrus	1.36 – 1.38	30

As imagens são processadas na Serviço Geológico Norte-americano (*United State Geological Survey's-USGS*), através do *Earth e Resources Observation and Science Center* (EROS) e disponibilizadas gratuitamente. As aplicações de dados Landsat incluem a agricultura, mapeamento de terra, detecção de alterações para usos em águas doces e costeiras e neve e gelo (ROY et al., 2014).

As bandas Landsat 8 utilizadas foram do sensor *Operational Terra Imager* (OLI), as quais possuem uma vasta aplicação para a composições com estas bandas, algumas estão listadas na tabela 10, a seguir.

Tabela 10: Composições de bandas Landsat 8 e algumas aplicações (EMBRAPA, 2016).

Aplicações	BANDAS L8
Coors Naturais	4 3 2
Falsa cor (área urbana)	7 6 4
Infravermelho (vegetação)	5 4 3
Agricultura	6 5 2
Infiltração atmosférica	7 6 5
Vegetação saudável	5 6 2
Água/Cobertura do solo	5 6 4
Remoção Ruídos Atmosféricos	7 5 3
Infravermelho de onda curta	7 5 4
Análise da Vegetação	6 5 4

2.2 Sentinel 2

A missão Sentinel 1 opera na região das micro-ondas e as missões Sentinel-2 e 3 nas regiões do visível e do infravermelho do espectro eletromagnético. Cada uma das missões Sentinel são constituídas por dois satélites que operam em conjunto com o objetivo de aumentar a frequência de aquisição de imagens (ESA, 2016).

A missão Sentinel 2 tem órbita polar, dispõe de um sensor MSI (*Multi Spectral Instrument*), que funciona de forma passiva e tem capacidade para capturar medidas de radiações da camada superior da atmosfera com 13 bandas espectrais, com grande resolução espacial (quatro bandas a 10 metros, seis bandas a 20 metros e três bandas a 60 metros), largura de varredura de 290km, e uma resolução temporal de 10 dias com um satélite e de 5 dias apenas com os dois satélites operacionais (DRUSCH et al. 2012; HAGOLLE et al. 2015; SEGL et al. 2015).

A existência de bandas de 10 m cobrindo a cena oferece excelentes oportunidades para diminuir a escala das faixas de 20 m a 10 m de resolução espacial para fornecer informações espaciais mais detalhadas (WANG et al., 2016).

Segundo ESA (2016), a missão Sentinel 2 é essencialmente dedicada a:

- Serviços de monitoramento do meio terrestre, na criação de mapas de ocupação e uso do solo, caracterização de alterações e mapas de variáveis biogeofísicas (e.g. percentagem de coberto vegetal, índice de clorofila, índice de área foliar);
- Serviços de suporte à gestão de emergências, nomeadamente através do mapeamento de áreas urbanas localizadas em zonas de risco de ocorrência de desastres naturais;
- Serviços relativos a segurança, nomeadamente vigilância marítima e de fronteiras, atividades de apoio à ação externa da União Europeia;
- Serviços de monitoramento de alterações climáticas.

Para o Sentinel 2, existem três resoluções espaciais (Tabela 11) e o processamento de suas imagens é pela combinação de técnicas de correções atmosféricas, adaptado ao módulo de classificação da cena, tal como descrito em Louis, Charantonis, Berthelot (2010). O processamento a Nível 1C, tem como entrada as imagens nível 2A e a saída são imagens de reflectância atmosférica

corrigida. Saídas adicionais são um mapa de espessura óptica de aerossóis; de vapor de água e de classificação de cena, junto com indicadores de qualidade para probabilidade de nuvens e de neve com 60 m de resolução.

Tabela 11: Comprimentos de onda e largura de banda de resoluções espaciais instrumento MSI (ESA, 2016)

Resolução espacial (m)	Bandas	Comprimento de onda central (nm)	Faixa espectral (nm)
10	2	490	65
	3	560	35
	4	665	30
	8a	842	115
20	5	705	15
	6	740	15
	7	783	20
	8b	865	20
	11	1 610	90
	12	2 190	180
60	1	443	20
	9	945	20
	10	1 380	30

2.3 Índices espectrais da água

Diferentes índices de água já foram propostos nas últimas décadas. Especificamente, McFeeters (1996) propôs o *Normalized Difference Water Index* (NDWI), usando as bandas verde e infravermelho próximo de imagens orbitais. Com base no fenômeno de que o corpo de água tem forte absorção e baixa radiação na faixa dos comprimentos de onda do visível ao infravermelho (DU et al., 2016).

McFeeters (1996) iniciou os estudos com *Normalized Difference Water Index* (NDWI) com as bandas verde (banda 2) e infra-vermelho (banda 4) do Landsat TM. Este índice foi adaptado por outros autores, porém Xu (2006) notou que o NDWI não distinguia de forma eficaz a superfície de áreas urbanas da superfície da água e propôs o *Modified Normalized Difference Water Index* (MNDWI), em que a banda 4 foi substituída pela banda 5 com Landsat 5 TM.

Feysa et al. (2014) formulou o *Automated Water Extraction Index* (AWEI), dividindo-o em dois índices com o uso de dados Landsat 5 TM: enquanto AWEI com o sufixo “nsh” são adequadas para superfícies em que as sombras não são um grande problema, já AWEI com o sufixo “sh” indica que a equação tem como

objetivo efetivamente eliminar os pixels de sombra e melhorar a exatidão da extração de água em áreas com sombra e/ou outras superfícies escuras . O autor conclui que este novo método também seria adequado para estudos de detecção de mudanças da superfície da água, uma vez que classifica os pixels de forma estável quando apresentam uma magnitude extrema expressando manifestação de determinado fenômeno.

Gautam et al. (2015) propôs o monitoramento dinâmico da água testando *Water Ratio Index* (WRI); o qual usa reflectância na faixa verde (banda 2) e faixa infravermelho médio (banda 3) do Landsat-7 *Enhanced Thematic Mapper* (ETM+). O WRI, em geral, apresenta valores maiores que 1 (um) para água (SHEN et al (2010), (FANG-FANG et al. 2011). Já no índice K-T proposto por Kauth e Thomas (1976) método para distinguir três características especiais, os pesos são diferentes e o terceiro componente é tomado para representar a umidade do solo. Posteriormente, Crist e Cicone (1984) adaptaram a transformação aos seis canais Landsat TM, e a componente de umidade da transformação K-T pode ser utilizada para extrair informação de água com uma soma ponderada de bandas de TM (GAUTAM et al., 2015).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Área de estudo

Foram escolhidos seis pontos de coletas de água. Três no rio do Carmo, sendo dois a montante da foz do rio Gualaxo do Norte, ou seja, antes de receber a carga poluente deste e que serviu de testemunha, e um terceiro após a área urbana de Barra Longa (Figura 16). Os demais pontos de coletas foram no rio Gualaxo do Norte, sendo um próximo da sua foz. Todos os pontos tiveram suas coordenadas registradas com receptor GPS modelo ETREX-30, da Garmin.

As coletas foram repetidas seis vezes, uma vez por mês, de abril a setembro de 2016, próximas das datas de varredura do satélite, totalizando trinta e seis. Porém apenas vinte e quatro foram utilizadas na avaliação. As imagens de maio e junho não puderam ser aproveitadas pela alta cobertura de nuvens, e as respectivas análises de características físico-químicas para os respectivos meses também desconsideradas.

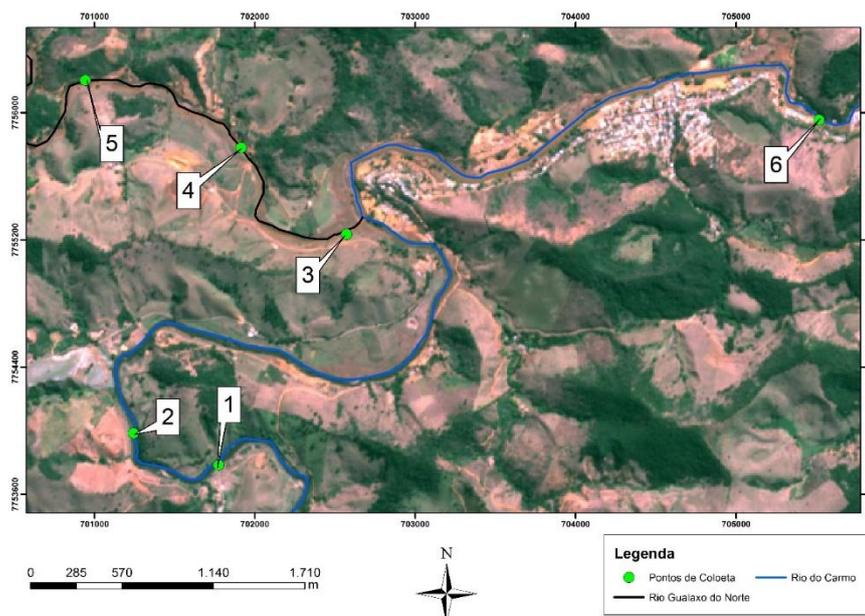


Figura 16: Localização dos pontos de coletas.

3.2 Análises físico-químicas

Foram utilizados os resultados das análises de turbidez, cor, metais em suspensão e elementos dissolvidos na água.

A turbidez foi lida pelo método nefelométrico resultando em unidades nefelométricas de turbidez (NTU) e a cor pelo aparelho color-test que resulta em valores de miligramas platina-cobalto por litro (mg Pt/L).

Para os metais em suspensão, 20 mL de amostra foram filtradas com filtros de acetato de celulose com porosidade de 0,45 μm . Posteriormente esses filtros foram colocados em estufa com temperatura de 100 °C por um período de 1 hora, de forma a eliminar toda a água existente no filtro (CETESB, 2011). O material remanescente da filtragem foi analisado utilizando espectrômetro de termofluorescência de raios -X.

Para os metais dissolvidos foram separados 9 ml de cada amostra que receberam 2 ml de HNO₃ para digestão em micro-ondas, utilizando o *método Microwave assisted acid digestion of aqueous samples and extracts* (US - EPA 3015A). Este processo prepara a solução até a análise dos teores totais dos metais pesados Cr, Cu, Mn, Ni, Fe, Cd, Pb, no ICP OES (espectrometria de emissão atômica com plasma acoplado indutivamente), conforme Smichowski; Marrero; e Gómez (2005) fizeram para análises de materiais poluentes no ambiente.

3.3 Satélites e Sensores

Os satélites utilizados foram Sentinel-2A, sensor *Multi Spectral Instrument* (MSI), e Landsat 8, sensor *Operational Terra Imager* (OLI) (Figura 17).

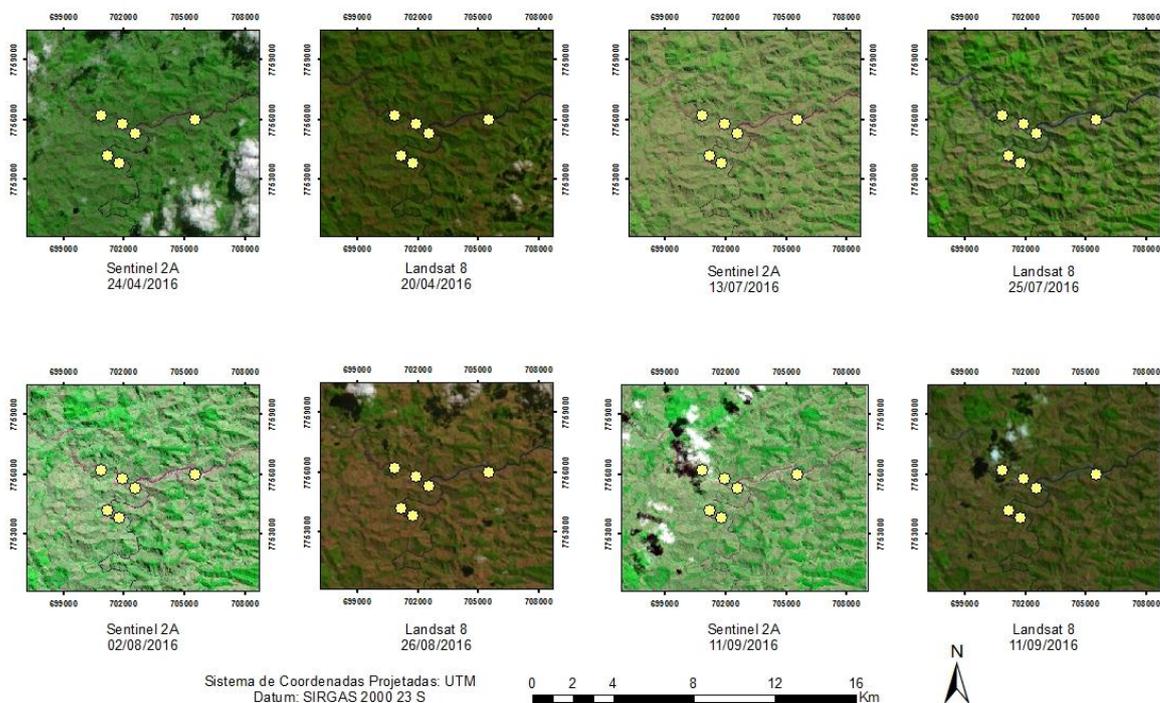


Figura 17: Imagem Sentinel-2A e Imagem Landsat-8 com os pontos de coleta.

As datas de aquisição das imagens foram próximas das datas de coletas de água nos rios estudados (Tabela 12).

3.4 Geoprocessamento

As imagens Sentinel-2A foram baixadas gratuitamente do site da European Space Agency (ESA), pelo link: <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>, no qual é necessário fazer um cadastro. As imagens disponibilizadas aos usuários cadastrados são as Nível 1 C, pré-processadas e os dados fornecidos têm a sua refletância ortorretificada na atmosfera (TOA). Máscaras de nuvem e de terra/água estão incluídos no produto (ESA, 2016).

Tabela 12: Datas de aquisição das imagens

Campo	MSI Sentinel 2		OLI Landsat 8	
	Data	Imagem	Data	Imagem
21/04/16	24/04/2016	S2A_OPER_PRD_MSIL1C_PDM C_20160424T211712_R095_V20 160424T130240_20160424T1302 40	20/04/2016	LC82170742016111LG N00
24/05/16	*	*	*	*
20/06/16	*	*	*	*
07/07/16	09/07/2016	S2A_OPER_PRD_MSIL1C_PDM C_20160713T203233_R095_V20 160713T130431_20160713T1304 31	25/07/2016	LC82170742016207LG N00
10/08/16	10/08/2016	S2A_OPER_PRD_MSIL1C_PDM C_20160802T215121_R095_V20 160802T130656_20160802T1306 56	10/08/2016	LC82170742016223LG N00
12/09/16	11/09/2016	S2A_OPER_PRD_MSIL1C_PDM C_20160911T222435_R095_V20 160911T130242_20160911T1303 42	11/09/2016	LC82170742016255LG N00

*Não foi possível utilizar estas imagens pela alta cobertura de nuvens na área de estudo.

As imagens Landsat-8 estão disponíveis gratuitamente no site do United States Geological Survey (USGS) pelo *link*: <https://earthexplorer.usgs.gov> Foram solicitadas as imagens com correção atmosférica de reflectância de superfície em *Data Sets > Landsat Archive > Pre-Collection > Landsat Surface Reflectance – L8 – OLI/TIRS*.

As imagens foram georreferenciadas de acordo com uma imagem inicial Sentinel (S2A_OPER_PRD_MSIL1C_PDMC_20160424T211712_R095_V20160424T130240_20160424T130240) e foram salvas todas com tamanhos de células iguais a 10m e com as composições de bandas, banda 1 a banda 7, para Landsat 8 e banda 2 a banda 12, para Sentinel 2 A. Faz-se necessário que as mesmas sejam corrigidas das suas distorções e os elementos que as constituem fiquem referidos a algum sistema de coordenadas (QUEIROZ, 2003).

Na extração dos valores espectrais foi utilizada a ferramenta *Extract Multi Values to Points* do ArcGis e exportada a tabela de atributos em arquivo .csv para realizar as operações no *software R*.

3.5 Índices espectrais da água

Foram avaliados diferentes índices para corpos d'água afim de identificar quais apresentavam resultados melhor correlacionados com as características da água dos pontos de coleta *in situ*. Os índices, seus respectivos autores, e fórmulas estão contidos na tabela 13.

Tabela 13: Fórmulas dos índices testados na correlação

Nome	Autor	Fórmula Geral	Sentinel 2A	Landsat 8
Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)	Rouse et al (1973)	$NDVI = (RED - NIR) / (RED + NIR)$	$NDVI = (B4 - B8) / (B4 + B8)$	$NDVI = (B4 - B5) / (B4 + B5)$
Water Ratio Index (WRI)	Shen et al (2010), FANG-FANG et al. (2011)	$WRI = (Green + NIR) / (NIR + MIR)$	$WRI = (B3 + B8) / (B8 + B11)$	$WRI = (B3 + B5) / (B5 + B6)$
Normalized Difference Water Index (NDWI)	McFeeters (1996)	$NDWI = (Green - NIR) / (Green + NIR)$	$NDWI = (B3 - B8) / (B3 + B8)$	$NDWI = (B3 - B5) / (B3 + B5)$
Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI)	Xu (2006)	$MNDWI = (Green - MIR) / (Green + MIR)$	$MNDWI = (B3 - B11) / (B3 + B11)$	$MNDWI = (B3 - B6) / (B3 + B6)$
K-T Wetness	Kauth e Thomas (1976)	$Wetness = 0.1509 \times Blue + 0.1793 \times Green + 0.3279 \times Red + 0.3406 \times NIR + 0.7112 \times MIR - 0.4572 \times SWIR$	$Wetness = 0.1509 \times B2 + 0.1793 \times B3 + 0.3279 \times B4 + 0.3406 \times B8 + 0.7112 \times B11 - 0.4572 \times B12$	$Wetness = 0.1509 \times B2 + 0.1793 \times B3 + 0.3279 \times B4 + 0.3406 \times B5 + 0.7112 \times B6 - 0.4572 \times B7$
Automated Water Extraction Index (AWEI)	FEYISA et al. (2014)	$AWEI_{nsh} = 4 \times (Green - SWIR) - (0,25 \times NIR + 2,75 \times SWIR)$ $AWEI_{sh} = Blue + 2,5 \times Green - 1,5 \times (NIR + SWIR) - 0,25 \times SWIR$	$AWEI_{nsh} = 4 \times (B3 - B12) - (0,25 \times B8 + 2,75 \times B12)$ $AWEI_{sh} = B2 + 2,5 \times B3 - 1,5 \times (B8 + B12) - 0,25 \times B12$	$AWEI_{nsh} = 4 \times (B3 - B7) - (0,25 \times B5 + 2,75 \times B7)$ $AWEI_{sh} = B2 + 2,5 \times B3 - 1,5 \times (B5 + B7) - 0,25 \times B7$
IIA Índice Indicador de Corpos de Água	Poliodoro, Imai, Tomazzelli (2004)	$IIA = (Green - 4 \times NIR) / (Green + 4 \times NIR)$	$IIA = (B3 - 4 \times B8) / (B3 + 4 \times B8)$	$IIA = (B3 - 4 \times B5) / (B3 + 4 \times B5)$
Ferrous Iron Index (FII)	Kalinowski e Oliver (2004).	$FII = SWIR / NIR + GREEN / RED$	$FII = B12 / B8 + B3 / B4$	$FII = B7 / B5 + B3 / B4$

*B = banda do satélite. Apresentadas nas tabelas 7 e 8.

Foram utilizadas as bandas registradas pelos sensores do Landsat 8 e do Sentinel 2 apresentadas nas tabelas 14 e 15.

Tabela 14: Características das bandas do satélite Sentinel 2, sensor MSI

Banda	Nome da Banda	Comprimento de Onda	Resolução espacial
B2	Azul	490	10 m
B3	Verde	560	
B4	Vermelho	665	
B8	Infravermelho Próximo	842	
B5	Vermelho extremo 1	705	20 m
B6	Vermelho extremo 2	740	
B7	Vermelho extremo 3	783	
B8A	Vermelho extremo 4	865	
B11	Infravermelho onda curta 1	1610	
B12	Infravermelho onda curta 2	2190	

Tabela 15: Características das bandas do satélite Landsat 8, sensor OLI

Nome da Banda Landsat-8	Comprimento de onda	Resolução espacial
B1 – Ultra-azul	430 – 450	30
B2 – Azul	450 – 510	
B3 – Verde	530 – 590	
B4 – Vermelho	640 – 670	
B5 – Infravermelho Próximo	850 – 880	
B6 – Infravermelho onda curta 1	1570 – 1650	
B7 – Infravermelho onda curta 2	2110 – 2290	

3.6 Análise estatística

Com objetivo de verificar se a resposta de reflectância de sensoriamento remoto obtida pelos sensores era compatível com as medidas obtidas a campo, foram testados dois métodos de predição para seleção das variáveis mais significativas para o modelo. Esses métodos foram: *Random Forests* (BREIMAN, 2001), e regressão linear (RLM), fórmula aplicada por Chambers (1992) e inspirada no modelo de Wilkinson & Rogers (1973), realizadas com o software R (THE R FOUNDATION, 2012).

No método *Random Forests* (RF) apenas três parâmetros precisam ser definidos: o número de árvores na floresta (*ntree*), o número mínimo de dados em cada nó terminal (*nodesize*) e o número de variáveis utilizadas em cada árvore (*mtry*) (LIAW & WIENER, 2002).

Todas as variáveis neste trabalho, tanto as variáveis preditivas (x) (Tabela 15) quanto as dependentes (y) (Tabela 16) são extraídas dos mesmos pontos de coleta.

Tabela 16: Variáveis x: Características físico-químicas da água

Características físico-químicas da água	Variáveis independentes
Temperatura	T
Ph	Ph
Eh	Eh
Condutividade	Condut
Sólidos dissolvidos	sol.diss
Turbidez	turbidez
Cor	cor
Cromo*	Cr
Cobre*	Cu
Manganês*	mn
Ferro*	Fe
Níquel*	Ni
Cádmio*	Cd
Chumbo*	Pb
Alumina (Óxido de alumínio)**	al2o3
Caulinita**	cao
Hematita**	fe2o3
Óxido de Potássio**	k2o
Óxido de Magnésio**	mgo
Óxido de Sódio**	na2o
Óxido de Silício**	sio2
Óxido de Titânio**	tio2
Trióxido de Arsênio**	as2o3
Trióxido de Cobalto**	co2o3
Trióxido de Cromo**	cr2o3
Óxido de Cobre**	cuo
Óxido de Mercúrio**	hgo
Óxido de Manganês**	mno
Óxido de níquel**	nio
Escândia**	sc2o3
Óxido de Sámario**	sm2o3
Óxido de Estrôncio**	sro
Óxido de Tório (Monazita)**	tho2
Octóxido de Urânio (<i>yellowcake</i>)**	u3o8
Pentóxido de Vanádio (Anidrido Vanádico)**	v2o5
Óxido de Zinco**	zno
Óxido de estrôncio**	zro2
Trióxido de Enxofre**	so3
Cloro**	cl
Trióxido de Carbono**	co3

*Elementos em solução, **Elementos em suspensão.

Os valores das covariáveis foram extraídas do pixel correspondente à posição de cada ponto de coleta e serão apresentadas na Tabela 17.

Tabela 17: Covariáveis : características espectrais

Bandas e índices espectrais	Variáveis dependentes
Sentinel 2 – banda 2	s02
Sentinel 2 – banda 3	s03
Sentinel 2 – banda 4	s04
Sentinel 2 – banda 5	s05
Sentinel 2 – banda 6	s06
Sentinel 2 – banda 7	s07
Sentinel 2 – banda 8	s08
Sentinel 2 – banda 8 ^a	s8a
Sentinel 2 – banda 9	s09
Sentinel 2 – banda 10	s10
Sentinel 2 – banda 11	s11
Sentinel 2 – banda 12	s12
Landsat – banda 1	l01
Landsat – banda 2	l02
Landsat – banda 3	l03
Landsat – banda 4	l04
Landsat – banda 5	l05
Landsat – banda 6	l06
Landsat – banda 7	l07
NDVI com bandas Landsat 8	ndvi_land
NDVI com bandas Sentinel 2	ndvi_sent
IIA com bandas Landsat 8	ia_land
IIA com bandas Sentinel 2	ia_sent
NDWI com bandas Landsat 8	ndwi_land
NDWI com bandas Sentinel 2	ndwi_sent
MNDWI com bandas Landsat 8	mndwi_land
MNDWI com bandas Sentinel 2	mndwi_sent
WRI com bandas Landsat 8	wri_land
WRI com bandas Sentinel 2	wri_sent
AWEIsh com bandas Landsat 8	awesh_land
AWEIsh com bandas Sentinel 2	awesh_sent
AWEInsh com bandas Landsat 8	aweinsh_land
AWEInsh com bandas Sentinel 2	aweinsh_sent
K-T Wetness com bandas Landsat 8	ktwetness_land
K-T Wetness com bandas Sentinel 2	ktwetness_sent
FII com bandas Landsat 8	fii_land
FII com bandas Sentinel 2	fii_sent
Mês de obtenção das imagens	Mês

As variáveis dependentes correspondem a resposta espectral em relação a cada característica físico-química. Para a interpretação da significância dos dados foi usado o coeficiente de determinação (R^2), além de ter sido desenvolvidos modelos lineares, para expressar de forma mais simples o fenômeno e poder replicar para uma predição.

O R^2 é dado pela relação entre a soma dos quadrados dos resíduos da regressão (SQR) e a soma total dos quadrados (SQT), como mostra a equação:

$$R^2 = \frac{SQR}{SQT} = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

Em que, R^2 é o coeficiente de determinação ($0 \leq R^2 \leq 1$); y_i é o valor observado da variável dependente; \hat{y}_i é o valor estimado da variável dependente; e \bar{y} é a média da variável dependente.

Outra forma de avaliar a confiabilidade do modelo foi pelo RMSE (raiz quadrada do erro médio quadrático), calculada conforme a seguinte equação:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{n}}$$

Na qual, d é a diferença entre os valores observados e os valores preditos; e n é o número total de amostras. Assim, quanto maiores são os valores da RMSE, maiores são as discrepâncias entre os conjuntos de dados e em relação à magnitude dos dados (BHERING et al. 2016).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 *Random Forests* (RF)

De maneira geral, os modelos gerados pelo RF apresentaram ajustes satisfatórios para os parâmetros de qualidade da água selecionados para esse trabalho (turbidez, cor e teor de ferro). Os modelos com melhores coeficientes de determinação foram os relacionados com o manganês, tanto para o óxido de manganês, com $R^2 = 0,88$; utilizando seis covariáveis (s08, s05, l06, ktwetness_land, iia_sent, aweish_land), como para o manganês dissolvido, com $R^2 = 0,86$, com as variáveis selecionadas: s08, l05, ktwetness_land, iia_sent, ndwi_sent, fii_sent. Esses resultados foram alcançados por tratar-se de elemento fortemente ligado ao ferro, que, a princípio, era o mais presente nos rejeitos lançados nos rios após o rompimento da barragem do Fundão. Os demais resultados estão apresentados na Tabela 18.

Tabela 18: Resultados do R² e RMSE, para modelo *Random Forest*.

Propriedade da água	R ²	RMSE	Mtry*	Ntree**
temperatura	0,76	1,14	4	6
ph	0,72	0,28	2	6
eh	0,66	24,05	2	2
condutividade	0,13	0,02	2	11
Sólidos diss.	0,02	0,01	10	10
turbidez	0,85	81,88	6	6
cor	0,80	100,04	6	8
cr	0,26	0,00	7	7
cu	0,61	0,00	2	6
mn	0,86	0,06	3	6
fe	0,63	1,44	29	38
ni	0,19	0,01	2	3
cd	0,44	0,00	2	2
pb	0,05	0,01	2	38
al2o3	0,66	2,50	6	6
cao	0,27	0,43	3	9
fe2o3	0,67	2,56	2	2
k2o	0,71	0,12	8	8
mgo	0,12	0,41	11	38
na2o	0,00	0,75	2	3
sio2	0,69	5,45	4	4
tio2	0,57	0,06	10	10
as2o3	0,18	35,98	5	5
co2o3	0,52	26,56	38	38
cr2o3	0,09	118,15	2	14
cuo	0,50	25,70	2	38
hgo	0,03	4,75	10	10
mno	0,88	248,20	2	11
nio	0,12	3,88	11	11
sc2o3	0,23	1,34	2	2
sm2o3	0,22	5,13	2	38
sro	0,47	16,66	2	4
tho2	0,14	7,08	2	38
u3o8	0,05	1,94	20	38
v2o5	0,32	8,80	2	38
zno	0,01	207,25	20	38
zro2	0,41	13,22	3	3
so3	0,06	0,02	2	15
cl	0,66	0,11	2	15
co3	0,71	9,94	4	7

*Mtry=Número de variáveis aleatoriamente amostradas como candidatos em cada divisão.

**Ntree=número de árvores de decisão usados.

Para os parâmetros de maior interesse, todos apresentaram elevados coeficientes de determinação, como o ferro (0,63), a turbidez (0,85) e a cor (0,80), demonstrando a potencialidade do uso de imagens orbitais selecionadas para determinação dos seus valores, principalmente as do Sentinel-2, vistos que as covariáveis mais importantes foram oriundas desse satélite, sejam pelas bandas isoladas ou pelos índices gerados pela combinação delas (Tabela 19).

A banda correspondente ao infravermelho próximo do Sentinel (s08) foi a que melhor se correlacionou com a maioria das variáveis, seguido pelo ndwi gerado com as bandas desse mesmo satélite.

Tabela 19: Variáveis selecionadas pelo modelo *Random Forest* pela importância

Atributo	1ª variável	2ª variável	3ª variável	4ª variável	5ª variável	6ª variável
temperatura	s08	s8a	aweish_sent	l05	aweish_land	aweish_land
ph	s08	s8a	aweish_sent	l05	aweish_land	aweish_land
eh	mes	s10				
condutividade	s09	s05	mes	l05	s06	iia_land
Sólidos diss.	mndwi_land	s04	fii_sent	l05	wri_land	mes
turbidez	s08	ndwi_sent	iia_sent	l05	aweish_sent	ktwetness_land
cor	s08	ndwi_sent	iia_sent	l05	aweish_sent	ktwetness_land
cr	mes	ndwi_land	iia_land	ndvi_land	ndvi_sent	l07
cu	s07	s06	s8a	s05	s08	iia_sent
mn	s08	l05	ktwetness_land	iia_sent	ndwi_sent	fii_sent
fe	fii_sent	s08	s04	l05	ktwetness_land	ndwi_sent
ni	mes	l06	s02			
cd	mes	s10				
pb	mndwi_land	iia_land	s10	wri_land	ndwi_land	mes
al2o3	s08	ndwi_sent	iia_sent	s05	aweish_sent	s06
cao	s08	aweish_land	l06	mndwi_sent	wri_sent	s05
fe2o3	s08	ndwi_sent				
k2o	s08	ndwi_sent	iia_sent	s05	l05	ktwetness_sent
mgo	l05	ndvi_land	wri_land	ndwi_land	s03	iia_land
na2o	s09	l05	ndwi_land			
sio2	s08	ndwi_sent	iia_sent	aweish_sent		
tio2	s08	ndwi_sent	iia_sent	s05	l05	ktwetness_land

Tabela 19: Variáveis... (continuação)

Atributo	1ª variável	2ª variável	3ª variável	4ª variável	5ª variável	6ª variável
as2o3	s05	s09	aweish_land	mndwi_land	wri_sent	
co2o3	s08	ndwi_sent	iia_sent	s05	aweish_sent	aweish_land
cr2o3	ktwetness_land	aweish_land	ndwi_land	l07	s08	l06
cuo	s08	ndwi_sent	aweish_land	iia_sent	l07	aweinsh_land
hgo	s08	s02	s04	iia_sent	l05	ndwi_sent
mno	s08	s05	l06	ktwetness_land	iia_sent	aweish_land
nio	aweish_land	aweinsh_land	ndvi_land	l05	s02	l07
sc2o3	mndwi_sent	s08				
sm2o3	s02	aweish_sent	ktwetness_land	l01	l02	s08
sro	s08	aweish_land	s05	iia_sent		
tho2	ndvi_sent	l02	iia_sent	ndwi_sent	l04	fii_land
u3o8	wri_land	wri_sent	iia_land	ndvi_sent	s03	ndwi_land
v2o5	s08	s02	iia_sent	fii_sent	ndwi_sent	s04
zno	aweinsh_land	iia_sent	l07	aweish_land	l05	ndwi_sent
zro2	s08	iia_sent	ndwi_sent			
so3	ndwi_sent	iia_sent	ndvi_land	s10	s07	mes
cl	s08	iia_sent	ndwi_sent	aweish_sent	l05	aweish_land
co3	s08	iia_sent	ndwi_sent	aweish_sent	s06	s05

Os valores de turbidez tiveram alta correlação com os resultados de reflectância, tanto para bandas, quanto para índices. As covariáveis selecionadas com pelo *Random Forest* foram, em ordem de importância para se determinar a turbidez foram: banda 8 do Sentinel (s08), índice normalizado de água com bandas sentinel (ndwi_sent), índice indicador de corpos de água (iia_sent), banda 5 do Landsat 8 (l05) e *Automated Water Extraction Index* com as bandas sentinel (aweish_sent). Essas mesmas covariáveis foram também as mais importantes para a variável cor, para um $R^2= 0,80$ e $RMSE=100,04$, indicando a elevada correlação entre estes dois parâmetros.

Vários autores relatam que as bandas do visível são mais eficientes na determinação de sólidos suspensos e turbidez em águas superficiais (SCHROETER & GLÄßER, 2011; USALI e ISMAIL, 2010; RITCHIE, ZIMBA & EVERITT, 2003), entretanto, no caso dos rios afetados pela pluma de sedimentos oriunda do rompimento da barragem, foi verificado que os índices que utilizam bandas do infravermelho, e as próprias bandas foram as covariáveis mais importantes para determinação desses parâmetros. Isso ocorreu devido ao fato do volume de rejeitos ser tão elevado nessas águas que a reflectância desses corpos

hídricos estariam mais próximo do padrão do próprio rejeito (ou de solos) do que da água. Esse comportamento é descrito por Polidorio, Imai e Tommaselli (2004), que relatam que a presença de sedimentos de solo na água provoca uma resposta espectral semelhante àquela emitida pelo solo molhado, o que confirmado por Torrent e Barrón (1993), que confirmam a intensa reflectância dos óxidos de ferro na região do infravermelho.

A correlação para ferro foi mais alta em Fe_2O_3 ($R^2= 0,67$, $\text{RMSE}=2,56$), com as covariáveis: banda 8 Sentinel (s08) e o índice normalizado de água com bandas sentinel (ndwi_sent). Esse resultado se destaca pelo elevado coeficiente de determinação utilizando apenas duas covariáveis, ambas relacionadas com o uso da banda do infravermelho. Para o Fe ($R^2=0,63$ e $\text{RMSE}=1,44$), as covariáveis mais importante foram: índice indicador de ferro (fii_sent), banda 8 Sentinel (s08), banda 4 Sentinel (s04), banda 5 Landsat (l05), índice de umidade K-T com bandas Landsat (ktwetness_land) e índice de água normalizado com bandas Sentinel (ndwi_sent).

Para explicar o fenômeno com todas as variáveis, foi calculada a frequência das covariáveis conforme a seleção realizada utilizando o Random Forest (Figura 18). Através da frequência obteve-se um ordenamento das variáveis por índices e bandas.

As bandas B8-sentinel e B5-landsat correspondem à região do infravermelho próximo, voltadas para estudos de corpos de água que possuem uma grande concentração de sólidos (ROTTA et al, 2009), também são utilizadas nos índices selecionados pelo modelo, o que indica que para uma classificação de imagens e formulação de índices para representar este tipo de variável ambiental (água com grande e variada carga de sedimentos) tais bandas devem estar contidas.

A diferença cronológica (tempo) também possuiu uma frequência elevada pois ele tem correlação com os elementos que são alterados conforme a oferta ou escassez de chuvas.

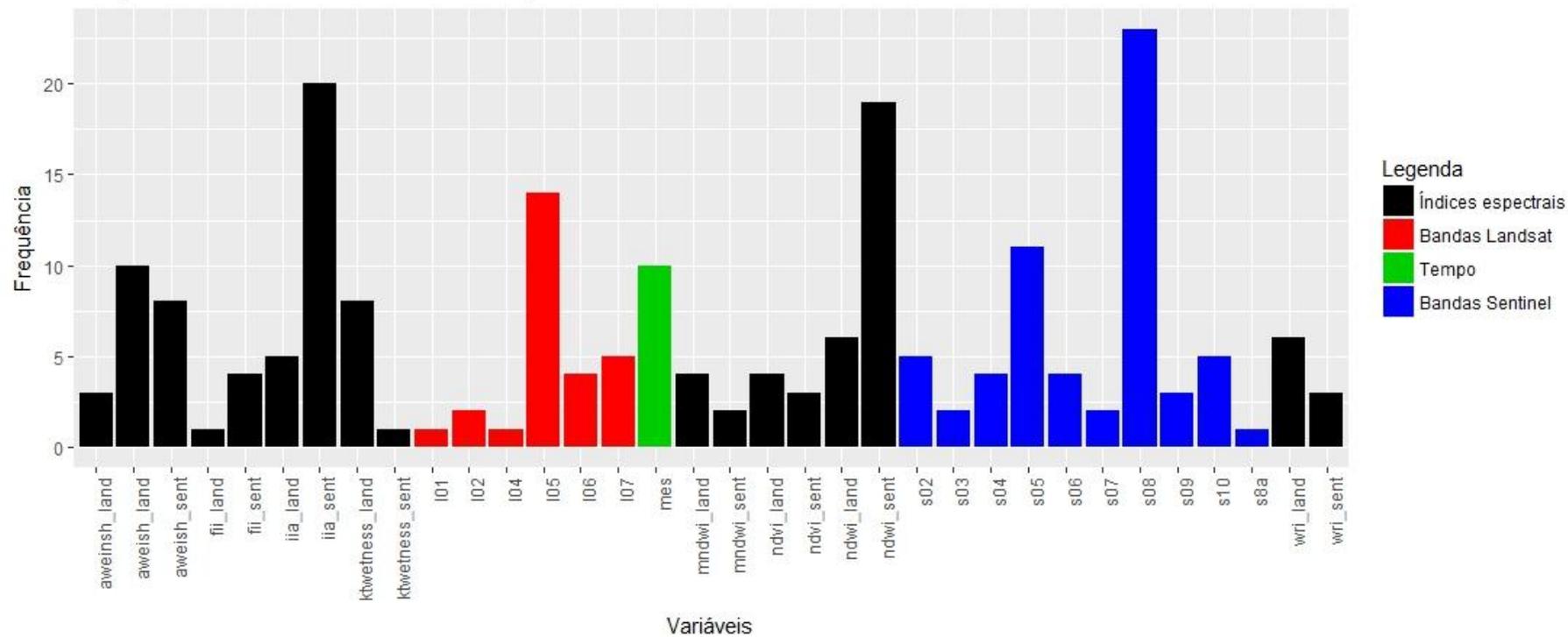


Figura 18: Frequência das covariáveis no modelo *Random Forests* (RF).

Tabela 20: Remoção das variáveis com mais de 95% de correlação.

Variáveis removidas	"ktwetness_sent", "s12", "l01", "l04", "s06", "fii_land", "s07", "aweish_sent", "l02", "s05", "ndwi_sent", "s04", "fii_sent", "l07", "mndwi_sent", "wri_land", "ia_land"
Variáveis que permaneceram no modelo	"s02", "s03", "s08", "s8a", "s09", "s10", "s11", "l03", "l05", "l06", "ndvi_land", "ndvi_sent", "ia_sent", "ndwi_land", "mndwi_land", "wri_sent", "aweish_land", "aweinsh_land", "aweinsh_sent", "ktwetness_land"

A partir das covariáveis remanescentes foi realizada outra determinação e de erro quadrático, apresentada na Figura 20. Observa-se que mesmo eliminado as que apresentavam correlação igual ou acima de 0,95, muitas das covariáveis que permaneceram, ainda apresentam correlações elevadas, tanto positivamente como negativamente.

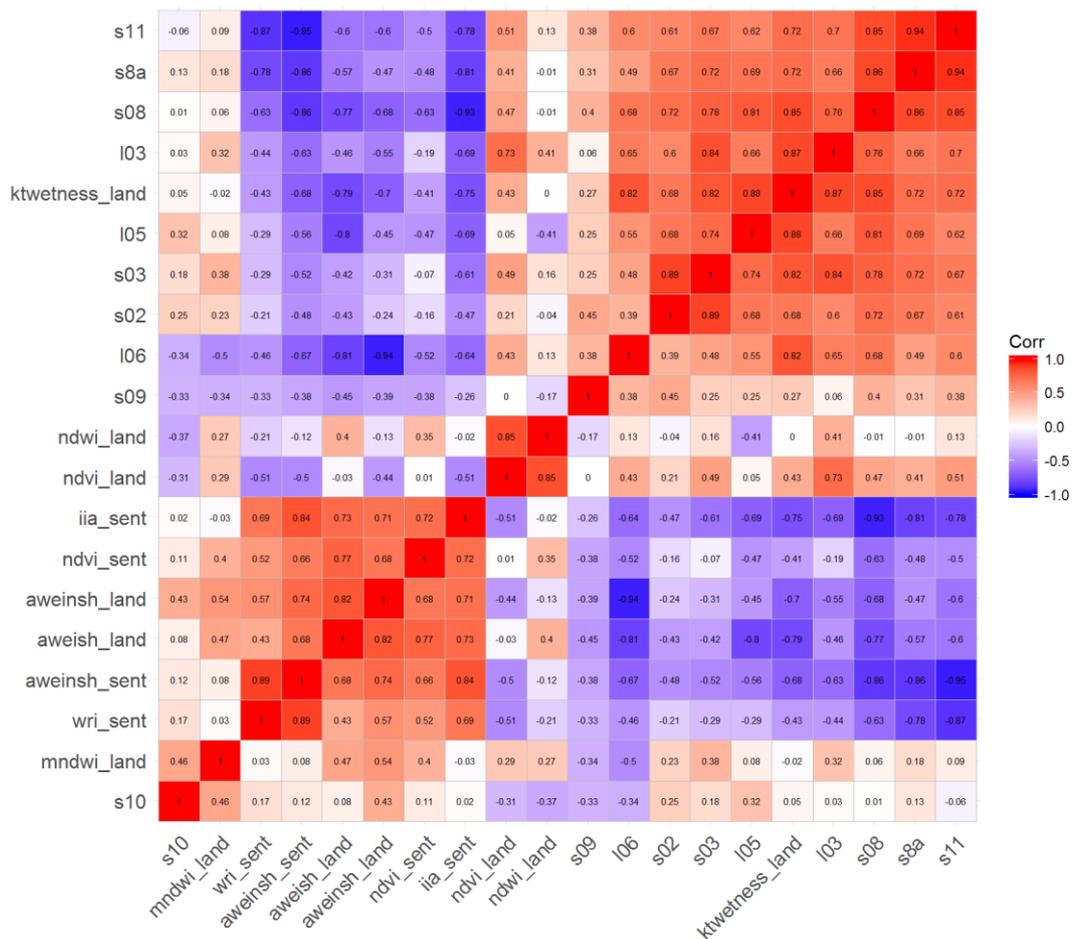


Figura 20: Correlação das variáveis que permaneceram no modelo.

Os resultados do modelo linear (Tabela 21) mostram um coeficiente de determinação em geral menor que no RF, com destaque para a turbidez (0,71), óxido de cobre (0,72) e manganês (0,64). O ferro apresentou coeficiente de 0,60.

Tabela 21: coeficiente de correlação e RMSE para RLM

elemento	R ²	RMSE
temperatura	0,64	1,42
ph	0,42	0,43
eh	0,19	59,96
condutividade	0,31	0,04
Sólidos diss.	0,04	0,01
turbidez	0,71	146,56
cor	0,56	176,78
cr	0,03	0,03
cu	0,54	0,01
mn	0,65	0,10
fe	0,60	1,77
ni	0,25	0,01
cd	0,18	0,01
pb	0,25	0,01
al2o3	0,62	2,85
cao	0,14	0,76
fe2o3	0,64	2,75
k2o	0,56	0,16
mgo	0,20	1,62
na2o	0,05	0,82
sio2	0,76	4,84
tio2	0,44	0,07
as2o3	0,61	71,85
co2o3	0,62	24,41
cr2o3	0,14	208,36
cuo	0,72	19,88
hgo	0,05	5,10
mno	0,39	474,88
nio	0,16	5,61
sc2o3	0,13	1,82
sm2o3	0,28	5,38
sro	0,59	15,96
tho2	0,27	15,38
u3o8	0,20	2,08
v2o5	0,37	8,54
zno	0,28	179,04
zro2	0,25	14,90
so3	0,12	0,12
cl	0,57	0,12
co3	0,71	10,21

O indicador de corpos d'água (IIA) foi desenvolvido por Poliodoro, Imai, Tomazzelli (2004), onde obteve bons resultados na distinção de corpos de água em relação a outras coberturas do solo, com imagens Landsat 5 TM, no presente trabalho está entre os primeiros índices (usando imagens do satélite Sentinel-2A),

aparece com alta frequência no modelo RF e foi selecionado para as variáveis que ajustam o modelo linear.

O índice AWEIsh, muito presente nas variáveis selecionadas do modelo linear para este estudo e com o uso de bandas do satélite Sentinel-2A. Feysa et al. 2014, mostrou que o índice fornece acurácia para mapear automaticamente superfícies de água retirando sombras e outras superfícies escuras. O fato de ter sido selecionado, mostra que AWEIsh é um índice que representa bem as características físico-químicas das águas contaminadas por rejeitos de mineração e que as imagens Sentinel- 2 A foram melhores para o uso deste índice.

MNDWI esteve presente na maioria dos ajustes dos modelos dos atributos no presente estudo, e explicou melhor as características da água contaminada do que o NDWI. O que corrobora com o trabalho de Xu (2016), que sugeriu a substituição do NDWI por MNDWI (trocando a banda NIR por MIR, na fórmula original do NDWI), para detecção de maiores detalhes no estudo de superfície da água de rio, lago e baía em Xiemen City, sudeste da China,

Obteve-se correlação alta do índice Ferrous Iron Index (FII) com a variável Fe dissolvido e Fe₂O₃, o que condiz com o uso deste índice para verificar a concentração de ferro no solo (KALINOWSKI e OLIVER, 2004). Observa-se que das bandas presentes neste índice, a banda B12 do Sentinel-2A e a banda B7 do Landsat 8, não estão nos ajustes isoladas. Isso pode confirmar que este índice é específico para este elemento.

Malthus et al. (2012), afirmou que o melhor sistema de sensores combinaria alta resolução temporal e resolução espectral o que determina a quantidade e a precisão com que as variáveis ópticas da qualidade da água são estimadas. No presente estudo os melhores resultados foram expressados com as bandas e os índices que utilizaram as bandas do satélite Sentinel-2A. Portanto, indicado para o monitoramento deste tipo de fenômeno. Pois, a missão é projetada como dois satélites que trabalharão em conjunto - Sentinel-2A está em órbita desde junho de 2015, e Sentinel-2B, com lançamento planejado para março de 2017. Com os dois em operação, a missão atingirá resolução temporal de cinco dias, oferecendo bandas a resolução espacial de dez metros.

O melhor índice de corpo d'água dentre os pesquisados na literatura e analisados neste trabalho para estimar os valores turbidez, cor, ferro e minerais

suspensos nas águas dos rios afetados foi o IIA (Índice Indicador de corpos de Água) com uso de bandas Sentinel 2.

5. CONCLUSÕES

A maneira mais simples de explicar o fenômeno foi através da regressão linear. Com a RFE (*recursive feature elimination*) foi possível selecionar as variáveis que melhor ajustaram o modelo, pois havia grande número de variáveis para poucos valores de amostragem.

Existiu correlação entre a reflectância registrada nas imagens Landsat 8 e Sentinel 2 A, com os respectivos teores de metais, cor e turbidez e demais variáveis águas contaminadas dos rios poluídos pelo rejeito de mineração, o que pode servir para verificar se águas de outros rios vêm adquirindo estas características, como forma de monitoramento de alterações causadas pela exploração de minérios e possíveis desastres.

O comportamento espectral da água dos rios afetados pelo rompimento da barragem assemelhou-se a de solos úmido em função do grande volume de rejeitos depositado em seus leitos.

As imagens dos satélites Landsat 8 e Sentinel 2A, suas bandas isoladamente ou os índices gerados, servem para estimar e monitorar as características físico-químicas nas águas dos rios afetadas pelo rompimento da barragem de Fundão.

Para compreender espectralmente a complexidade e diversidade dos atributos das águas superficiais contaminadas por minérios, sugere-se um maior esforço amostral e temporal em estudos posteriores.

REFERÊNCIAS

ABNT-Associação. Brasileira de. Normas Técnicas. **NBR 9898**. Preservação e técnicas de amostragem de efluentes líquidos e corpos receptores. JUN 1987.

AB´SABER, Aziz Nacib. Os Domínios de Natureza no Brasil. Potencialidades Paisagísticas. 4ª Ed. Atelier Editorial, 2007.

AKBAR, T. A.; HASSAN, Q. A.; ACHARI, G. A Remote sensing based framework for predicting water quality of different source waters. The International Archives of Photogrammetry, **Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, XXXVIII—Part 1, ISPRS, Calgary: Canadá. 2010.

ANA (Brasil). **Encarte especial sobre a Bacia do Rio Doce**. Conjuntura dos Recursos hídricos do Brasil, informe 2015, SPR - Superintendência de Planejamento de Recursos Hídricos, Agência Nacional de Águas – ANA. Brasília, 2015. Disponível em: <http://www2.ana.gov.br/paginas/riodoce/default.aspx>. Acessado em: junho 2016.

AZEVEDO, R.P. Uso da água subterrânea em sistema de abastecimento público de comunidade de várzeas na Amazônia Central. **Acta Amazônica**, 36 (4)Ç313-320. 2006.

BARBOSA, S.E.S; BARBOSA JÚNIOR, A.R.; SILVA, G.Q. da; CAMPOS, E.N.B; RODRIGUES, V.C. Geração de modelos de regionalização de vazões máximas, médias de longo período e mínimas de sete dias para a Bacia do Rio do Carmo, Minas Gerais **Eng. sanit. ambient**.Vol.10 - Nº 1 - jan/mar 2005, 64-71. 2005.

BHERING, S. B.; CHAGAS, C. S. ; CARVALHO JUNIOR, Waldir de ; PEREIRA, N. R.; CALDERANO FILHO, B.; PINHEIRO, H. S. K.. Mapeamento digital de areia, argila e carbono orgânico por modelos Random Forest sob diferentes resoluções espaciais. Pesquisa Agropecuária Brasileira (Online), v. 51, p. 1359-1370, 2016.

BILOTTA, G. S.; BRAZIER, R. E. Understanding the influence of suspended solids on water quality and aquatic biota, *Water Research*. 42 (12): 2849-2861. 2008.

BOWKER, L.N. AND CHAMBERS, D.M. The risk, public liability and economics of tailings storage facility failures. **Center for Science and Public Participation - Technical Reports**. July 21, 2015, <http://www.csp2.org/technical-reports>. Acesso: Outubro, 2016.

BREIMAN, L. **RANDOM FORESTS**. 2001.

BREZONIK, P. L.; OLMANSON, L. G.; FINLAY, J. C.; BAUER, M. E. Factors affecting the measurement of CDOM by remote sensing of optically complex inland waters. **Remote Sensing of Environment**, v. 157, p. 199-215, 2015.

CETESB (São Paulo). **Guia nacional de coleta e preservação de amostras: água, sedimento, comunidades aquáticas e efluentes líquidos / Companhia**

Ambiental do Estado de São Paulo; Organizadores: Carlos Jesus Brandão ... [et al.]. -- São Paulo: CETESB; Brasília: ANA, 2011. 326 p.: il

CASSETI, V. **Geomorfologia**, 2013. Acessado em maio de 2016.

CHAMBERS, J. M. Linear models. Chapter 4 of Statistical Models in S eds J. M. Chambers and T. J. **Hastie, Wadsworth & Brooks/Cole**. 1992.

CHEN, Q.L.; ZHANG, Y.Z.; EKROOS, A.; HALLIKAINEN, M. The role of remote sensing technology in the EU water framework directive (WFD). **Environ. Sci. Policy**, 7, 267–276. 2004.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. **RESOLUÇÃO Nº 357, DE 17 DE MARÇO DE 2005**. Publicada no DOU nº 053, de 18/03/2005, págs. 58-63. Alterada pela Resolucao 410/2009 e pela 430/2011. 2005.

COSTA, A. T. Geoquímica das Águas e dos Sedimentos da Bacia do Rio Gualaxo do Norte, leste-Sudeste do Quadrilátero Ferrífero (MG): Estudo de uma Área Afetada por Atividades de Extração Mineral. **Dissertação de Mestrado**. Universidade Federal de Ouro Preto. Departamento de Geologia Ouro Preto, março 2001.

CPRM (Brasil). a. Serviço Geológico do Brasil. DIGEOB - Divisão de Geologia Básica, DIGEOP - Divisão de Geoprocessamento, SU REG/BH - Superintendência Regional de Belo Horizonte, GEREM I/BH - Gerencia de Geologia de Recursos Minerais, GERIDE/BH - Gerencia de Relações Institucionais e Desenvolvimento. Mapa geológico do estado de Minas Gerais. **Consolidação dos dados em Sistemas de Informações Geográficas – SIG**. www.cprm.gov.br. 2014. Acesso em: dezembro, 2016.

CPRM (Brasil). b. Serviço Geológico do Brasil. **Monitoramento Especial da Bacia do Rio Doce – Relatório 1**. 33p. 2015.

CRIST E. P.; CICONE R. C. A. Physically - Based Transformation of Thematic Mapper Data--The TM Tasseled Cap, in **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, Vol. 22, No. 3, pp. 256-263. 1984.

DRUSCH, M., et al. Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. **Remote Sens. Environ.** 120, 25–36. 2012.

DU, Y.; ZHANG, Y.; LING, F.; WANG, Q.; LI, W.; LI, X. Water Bodies' Mapping from Sentinel-2 Imagery with Modified Normalized Difference Water Index at 10-m Spatial Resolution Produced by Sharpening the SWIR Band. **Remote Sensing**. 8, 354. 22 April 2016.

EMBRAPA (Brasil). **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária**. <http://www.sat.cnpm.embrapa.br/conteudo/missaolandsat.php>. 2016. Acesso: fevereiro, 2016.

ENDO, I. **Análise estrutural qualitativa do minério de ferro e encaixantes da Mina de Timbopeba – borda leste do Quadrilátero Ferrífero, Mariana, MG.** Universidade Federal da Ouro Preto, Ouro Preto, Dissertação de Mestrado, 130f. 1988.

EPIPHANIO, J.C.N. CBERS-3/4: características e potencialidades. **Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, Curitiba, PR, Brasil, 30 de abril a 05 de maio de 2011, INPE p.9009. 2011.

ESA - European Space Agency. **User Guides – Sentinel-2-MSI.** <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi>. 2000-2016. Acesso: Janeiro, 2016.

FASSONI-ANDRADE. Dados MODIS e Landsat-8 para análise da água da Lagoa dos Patos, RS. **Dissertação de Mestrado.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Março de 2015.

FERNANDES, G.W.; GOULART, F.F.; RANIERID, B.D.; COELHO, M.S.; DALES, K.; Nina BOESCHE, Mercedes BUSTAMANTE, CARVALHO, F.A; CARVALHO, D.C. DIRZO, R. FERNANDES, S.; GALETTI JR., P.M.; Garcia MILLAN, V.E.G.; MIELKE, C. RAMIREZ, J. L.; NEVES, A.; ROGASS, C.; RIBEIRO, S. P.; SCARIOT, A.; SOARES-FILHO, B. Deep into the mud: ecological and socio-economic impacts of the dam breach in Mariana, Brazil. **Natureza & Conservação**, 14, 35–45, 2016.

FEYSA, G. L.; MEILBY, H.; FENSHOLT, R.; PROUD, S. R. Automated Water Extraction Index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery. **Remote Sensing of Environment** 140, 23–35. 2014.

FRAGA, R.S.; TAVARES, V.E.Q.; TIMM, L.C.; ESTRELA, C.C.; BARTELS, G.K.. Influência da precipitação sobre parâmetros de qualidade da Água utilizada para irrigação do morangueiro no município de Turuçu-RS. **Revista Bras. Agrociência**, Pelotas, v.18 n. 1-4, p.81-94, jan-mar, 2012.

FRITZSONS, E.; HINDI, E. C.; MANTOVANI, L. E. et al. As alterações da qualidade da água do rio Capivari com o deflúvio: um instrumento de diagnóstico de qualidade ambiental. **Engenharia Sanitária e Ambiental**. v. 8, n. 4, p. 239-248, 2003.

GONÇALVES, I. S.; DIAS, H. C. T.; MARTINS, S. V.; SOUZA, A.L. de. Fatores edáficos e as variações florísticas de um trecho de mata ciliar do rio Gualaxo do Norte, Mariana, MG. **Revista Árvore** - v.35, n.6, 2011.

HAGOLLE, O., et al. SPOT-4 (take 5): Simulation of Sentinel-2 time series on 45 large sites. **Remote Sens.** 7, 12242–12264. 2015.

HAZEN, A. The Measurement of the Colors of Natural Waters. **American Chemist Journal**. (18:264), 1896.

IBAMA (Brasil). a. Laudo Técnico Preliminar: Impactos ambientais decorrentes do desastre envolvendo o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana, Minas

Gerais. In: **Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis** – IBAMA. Minas Gerais, 2015. Disponível em: http://www.ibama.gov.br/phocadownload/noticias_ambientais/laudo_tecnico_preliminar.pdf. Acesso em: 20 de junho. 2016.

IBAMA (Brasil). b. Termo de Transação e de Ajustamento de Conduta Relativo ao Rompimento da Barragem do Fundão em Mariana/MG. **Nota Técnica nº 1/2016-PRESID/IBAMA**. Componente: Programas Socioambientais. Brasília: 29/02/2016.

IBRAM - Instituto Brasileiro de Mineração. **Informações e Análises da Economia Mineral Brasileira**. 7ª edição. 2015. Disponível em: <http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00002806.pdf>. Acesso em: janeiro, 2016.

IGAM (Minas Gerais). a. Relatório de 17 de Novembro de 2015. Instituto Mineiro de Gestão das Águas. Disponível em: <http://www.igam.mg.gov.br/component/content/article/16/1632-monitoramento-da-qualidade-das-aguas-superficiais-do-rio-doce-no-estado-de-minas-gerais>. Acesso em: 16/05/2016.

IGAM (Minas Gerais). b. Encarte especial sobre a qualidade da água do Rio Doce após o rompimento de barragem da Samarco no distrito de Bento Rodrigues. http://www.igam.mg.gov.br/images/stories/2016/QUALIDADE/ENCARTE_ESPECIAL_SOBRE_A_QUALIDADE_DA_%C3%81GUA_DO_RIO_DOCE_AP%C3%93S_O_ROMPIMENTO_DE_BARRAGEM_DA_SAMARCO_NO_DISTRITO_DE_BENTO_RODRIGUES.pdf. 2016.

IGAM (Minas Gerais). c. <http://portalinfohidro.igam.mg.gov.br/publicacoes-tecnicas/qualidade-das-aguas/qualidade-das-aguas-superficiais/dados-serie-historica-de-monitoramento/9648-2015>. 2015.

INMET - INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Precipitação Acumulada Mensal e Anual (mm): 1961–1990. Cópia arquivada desde o original em 4 de maio de 2014. *Consultado em 17 de janeiro de 2017*.

JENSEN, J. R. Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres; Tradução: José Carlos Neves Epiphany et al.(coord.). São José dos Campos: **Parêntese**. Livro, 589 p. 2009.

KABBARA, N. BENKHELIL, J. AWAD, M., BARALE, V. Monitoring water quality in the coastal area of Tripoli (Lebanon) using high-resolution satellite data. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 63, 488–495. 2008.

KABATA-PENDIAS, A. Trace Elements in Soils and Plants. **CRC Press Taylor & Francis Group**. Fourth edition. 505p. 2011.

KALINOWSKI, A.; OLIVER, S. ASTER Mineral Index Processing Manual, Remote Sensing Applications; **Geoscience**. Australia: Canberra, Australia, 2004.

KAUTH R. J., THOMAS G. S. The Tasselled Cap- a Graphic Description of the Spectral-Temporal Development of Agricultural Crops as seen by Landsat, **Proc. Of The Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed Data**, Purdue University, West Lafayette, Indiana, pp. 4B-41- 4B-50. 1976.

KEMKER, C. Stream flow and turbidity are often directly related, 2014. Disponível em: http://www.fondriest.com/environmental-measurements/wp-content/uploads/2014/06/480x195xturbidity_streamflow.jpg.pagespeed.ic.3561OncUTC.jpg. **Environmental measurements**. Online. Acesso em: 15 out. 2016.

KNIGHT, E.J., & KVARAN, G. Landsat-8 Operational Land Imager Design, Characterization and Performance. **Remote Sensing**. 6, 10286-10305. 2014. ISSN 2072-4292. www.mdpi.com/journal/remotesensing. Acesso em: Janeiro, 2016.

KÖEPPEN W. Climatologia. **Ed. Fund. de Cult. Econômica**. 478p. México, 1948.

LABONNE, B. Mining dam failure: business as usual? **Extr.Ind. Soc.** 3, 651–652. 2016.

LIAW, A.; WIENER, M. Classification and regression by randomForest. *R News*, v.2/3, p.18-22, 2002.

LOUIS, J., A. CHARANTONIS, A., BERTHELOT, B. Cloud Detection for Sentinel-2. **Proceedings of ESA Living Planet Symposium 2010**. 2010.

MALTHUS, T.J.; HESTIR, E.L; DEKKER, A.G.; BRANDO, V. E. The case for a global inland water quality product. Environmental Earth Observation Program, Division of Land and Water, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, Canberra, Australia. **IGARSS 2012**.

MCFEETERS, S. K. The use of Normalized DifferenceWater Index (NDWI) in the delineation of open water features. **International Journal of Remote Sensing**, 17, 1425–1432. (1996).

MMA. Encarte especial sobre a Bacia do Rio Doce: Rompimento da Barragem em Mariana - MG. Agência Nacional de Águas. Ministério do Meio Ambiente. **Superintendência de Planejamento de Recursos Hídricos – SPR**. Brasília – DF. 2016.

MONTANHER, O. C.; SOUZA FILHO, E. E. de. Geração de algoritmos para predição de carga em suspensão em corpos hídricos da bacia hidrográfica do Rio Paraná com uso de imagens Landsat TM5. **XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, p. 5340–5347, 2011.

MONTANHER, O. C., NOVO, E. M., BARBOSA, C. C., RENNÓ, C. D., SILVA, T. S. Empirical models for estimating the suspended sediment concentration in Amazonian white water rivers using Landsat 5/TM. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, 29, 67-77. 2014.

OLIVEIRA, B. S. S.; da CUNHA, A. C. Correlação entre qualidade da água e variabilidade da precipitação no sul do Estado do Amapá. **Revista Ambiente & Água**; Taubaté. (Apr-Jun 2014): vol 2. 261-275. 2014.

PARRA, R.R.; ROESER, H.M.P.; LEITE, M.G.P., et al. Influência antrópica na geoquímica de água e sedimentos do rio Conceição, quadrilátero ferrífero, Minas Gerais – Brasil. **Geochimica Brasiliensis**, 21(1)036 - 049, 2007.

POLIDORIO, A. M., FLORES, F. C., IMAI, N. N., TOMMASELLI, A. M. Índice indicador de corpos d'água para imagens multiespectrais. **I Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação (SIMGEO)**. 2004. Disponível em: <https://www.ufpe.br/cgtg/ISIMGEO/CD/html/Fotogrametria%20e%20Sensoriamento%20Remoto/Artigos/f027.pdf>. Acessado em novembro 2016.

QUEIROZ, Corina Jará de. Análise de Transformações Geométricas para o Georreferenciamento de Imagens do Satélite CBERS-I. Dissertação de Mestrado. UFRGS - CEPSRM, 2003. Disponível: www.ufrgs.br/srm/DissertaçõesPos/A18.html.

RITCHIE, J.C., SCHIEBE, F.R & MCHENRY, J.R. Remote Sensing of Suspended Sediment in Surface Water. **Photographic Engineering Remote Sensing**, 42, 1539- 1545. 1976.

RITCHIE, J. C., ZIMBA, P. V., & EVERITT, J. H. Remote sensing techniques to assess water quality. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 69, 695–704. 2003.

ROUSE, J.W.; HAAS, R.H.; SCHELL, J.A.; DEERING, D.W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In Earth Resources Technology Satellite- 1 Symposium,3, 1973. Proceedings. Washington, 1973, v.1, Sec. A, p. 309-317.

ROY, D.P.; WULDER, M.A.; LOVELAND, T.R.; WOODCOCK, C.E.; ALLEN, R.G.; ANDERSON, M.C.; HELDER, D.; IRONS, J.R.; JOHNSON, D.M.; KENNEDY, R.; et al. Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research. **Remote Sens. Environ.** 145, 154–172. 2014.

RYU, J-H.; WON, J-S.; MIN, K. D. Waterline extraction from Landsat TM data in a tidal flat A case study in Gomso Bay, Korea. **Remote Sensing of Environment** 83 442–456. 2002.

SAMPAIO, A.C.S. **Metais pesados na água e sedimentos dos rios da bacia do Alto Paraguai**. Campo Grande: UFMS. Dissertação. 76p. 2003.

SILVA, A. E. P.; ANGELIS, C.F. MACHADO, L.A.T. WAICHAMAN, A.V. Influência da precipitação na qualidade da água do Rio Purus. *Acta Amazônica*, Manaus, v. 38, n. 4, p. 733-742, dezembro, 2008.

SCHAEFER, C.E.G.R.; SANTOS, E.E.; FERNANDES FILHO, E.I.; ASSIS, I.R. de. Paisagens de Lama: Os Tecnosolos para recuperação ambiental de áreas

afetadas pelo desastre da barragem do Fundão, em Mariana. **Boletim informativo Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo - Campinas: SBCS.v.: Volume 42. Número 1. www.sbcs.org.br Janeiro/Abril de 2016

SCHROETER, L.; GLÄßER, C. Analyses and monitoring of lignite mining lakes in Eastern Germany with spectral signatures of Landsat TM satellite data. **International Journal of Coal Geology**, v. 86, n. 1, p. 27–39, 2011.

SEGL, K., GUANTER, L., GASCON, F., KUESTER, T., ROGASS, C., MIELKE, C., S2eteS: An end-to-end modeling tool for the simulation of Sentinel-2 image products. **IEEE Trans. Geosciences Remote Sensing**. 53, 5560–5571. 2015.

SMICHOWSKI, P., MARRERO, J., GÓMEZ, D. Inductively coupled plasma optical emission spectrometric determination of trace element in PM_{2,5} airborne particulate matter collected in an industrial area of Argentina. *Microchemical Journal*, 80, p.9–17. 2005.

SOUZA, L. A.; SOBREIRA, F. G.; PRADO FILHO, J. F. Cartografia e diagnóstico geoambiental aplicados ao ordenamento territorial do município de Mariana MG. *Revista Brasileira de Cartografia*, v.57, n.3, p.189-204, 2005.

THE R FOUNDATION. R: the R project for statistical computing. **Vienna: The R Foundation**, 2012.

UFV - CETEC - UFLA - FEAM. Mapa de solos do Estado de Minas Gerais. Belo Horizonte, Fundação Estadual do Meio Ambiente, 2010. 49p. Disponível em: <<http://www.feam.br/noticias/1/949-mapas-de-solo-do-estado-de-minas-gerais>> Acesso em: novembro, 2016.

USALI, N., ISMAIL, Mohd Hasmadi. Use of remote sensing and GIS in monitoring water quality. **Journal of sustainable development**, v. 3, n. 3, p. 228, 2010.

WANG, Q.; SHI, W.; LI, W.; ATKINSON, P.M. Fusion of Sentinel-2 images. **Remote Sensing of Environment**. 187 ed. 241–252p. 2016.

WILKINSON, G. N., ROGERS, C. E. Symbolic descriptions of factorial models for analysis of variance. *Applied Statistics*, 22, 392–9. 1973.

Xu, H. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. **International Journal of Remote Sensing**, 27, 3025–3033. 2006.