



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA CIVIL

HIGOR COSTA DE BRITO

APLICAÇÃO DE SENSORIAMENTO REMOTO COMO FERRAMENTA DE
MONITORAMENTO DE PARÂMETROS DE QUALIDADE DA ÁGUA EM
CORPOS HÍDRICOS

CAMPINA GRANDE

2018

HIGOR COSTA DE BRITO

APLICAÇÃO DE SENSORIAMENTO REMOTO COMO FERRAMENTA DE
MONITORAMENTO DE PARÂMETROS DE QUALIDADE DA ÁGUA EM
CORPOS HÍDRICOS.

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Federal de
Campina Grande – UFCG, para
encerramento do componente curricular e
conclusão da graduação em Engenharia
Civil.

**Orientadores: Dra. Iana Alexandra Alves Rufino
Dra. Rochele Sheila Vasconcelos**

CAMPINA GRANDE - PB

2018

Aos meus padrinhos, Maria e Francisco, meus pais Elza e Deusdet e a toda minha família que, com muito carinho e apoio, jamais mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa de minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que me deu forças para concluir toda essa jornada.

À minha orientadora Rochele Sheila Vasconcelos, por toda dedicação e confiança em mim depositada ao longo do nosso período de trabalho. Espero um dia poder retribuir todo esse apoio.

Às professoras Iana Alexandra Alves Rufino e Selma Maria de Araújo por todo suporte, carinho e incentivo.

A todos os que compõem o Laboratório de Hidráulica II, por todo o companheirismo e afeto, fazendo do ambiente de trabalho um local extremamente prazeroso.

Aos meus amigos Alana, Ana Flávia, Eduarda, Heloisa, Jessica, Kaio, Leonardo, Maria Alinne, Stella e Thiago por me suportarem em todos os momentos. Não teria conseguido sem vocês.

“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o que era antes”.

(Martin Luther King)

RESUMO

A gestão dos recursos hídricos visa garantir os usos múltiplos da água, no entanto, essa diversificação de usos quando realizada de forma inadequada, provoca alterações na qualidade da mesma, comprometendo os recursos hídricos. No Brasil, o monitoramento de corpos hídricos acontece de forma deficitária, acarretando diversos problemas em questões referentes ao abastecimento humano. Este estudo tem como objetivo analisar alguns parâmetros de qualidade da água (turbidez, clorofila *a* e profundidade do disco de Secchi) no Rio Doce, utilizando imagens do satélite Landsat 8, disponibilizadas na plataforma do Google Earth Engine. A análise parte de períodos de interesse feitos com base nas características antes, durante e após o rompimento da Barragem de Fundão, considerado o desastre de maior impacto ambiental da história do Brasil, comparando dados disponibilizados por órgãos governamentais a combinações de bandas do satélite. Os resultados obtidos demonstraram a eficácia do sensoriamento remoto como ferramenta para monitoramento de parâmetros de qualidade de água visíveis, destacando mudanças drásticas no período do desastre, como aumento da turbidez na faixa de 445% e 29% na perda de transparência do rio. Além da análise por período, a trajetória do pixel no local onde se localiza cada estação foi analisada, demonstrando uma forma consistente de detectar mudanças no padrão de turbidez do corpo hídrico.

Palavras-chave: Rio Doce, Google Earth Engine, Landsat 8.

ABSTRACT

Water resources management aims to guarantee multiple uses of water, even when there is a diversification of uses and always with a better quality as possible. In Brazil, the water monitoring of lakes and rivers usually are not continuous and mostly are not enough to guarantee a good and safe human supply. This study aims to analyze some water quality parameters (turbidity, chlorophyll a and depth of the Secchi Disk) in the "Doce River", using Landsat 8 satellite images available by Google Earth Engine platform. The analysis starts before, during and after the disruption of Fundão dam (Mariana environmental disaster), considered the most environmental disaster of the Brazilian history. Observed data (from government agencies) are compared to combinations of satellite bands. The results showed the effectiveness of remote sensing as a tool for monitoring visible water quality parameters, highlighting drastic changes in the period of the disaster, such as turbidity increase in 445% and 29% in the loss of river transparency. In addition to the analysis for the period, the trajectory of the place (pixel) where each station is located was analyzed using all the images between the years of 2013 and 2018, demonstrating a consistent way of detecting changes in the turbidity pattern of the water body.

Keywords: Doce River, Google Earth Engine, Landsat 8.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Impurezas da água de acordo com suas características.....	13
Figura 2 – O disco de Secchi.	16
Figura 3 – Obtenção de imagens por sensoriamento remoto.....	17
Figura 4 – Radiação detectada por um sensor remoto acima de um corpo de água.	19
Figura 5 – Visão espacial do curso do rio afetado pelo desastre.	24
Figura 6 – Distribuição espacial das estações de monitoramento	25
Figura 7 – Área de abrangência considerada para cada estação de monitoramento.....	27
Figura 8 – Interseção entre mapa do período e NDWI.	28
Figura 9 – Fluxograma metodológico.	29
Figura 10 – Metodologia para quantificação dos resultados obtidos via Sensoriamento Remoto.	31
Figura 11 – Valores e variabilidade da clorofila <i>a</i> para a estação RD072.	32
Figura 12 – Valores e variabilidade da clorofila <i>a</i> para a estação RD033.	32
Figura 13 – Valores e variabilidade da clorofila <i>a</i> para a estação RD067.	33
Figura 14 – Perfil de elevação da trajetória do desastre (elaborado a partir do perfil topográfico fornecido pelo Google Earth).....	34
Figura 15 – Valores de turbidez estimados utilizando a banda do infravermelho próximo.	35
Figura 16 – Valores de turbidez estimados utilizando a banda do vermelho.	35
Figura 17 – Transparência da água a partir da relação do Disco de Secchi.	36
Figura 18 – Trajetória da banda do vermelho para a estação RD072.	37
Figura 19 – Trajetória da banda do infravermelho próximo para a estação RD072.	37
Figura 20 – Trajetória da banda do vermelho para a estação RD033.	38
Figura 21 – Trajetória da banda do infravermelho próximo para a estação RD033.	38
Figura 22 – Trajetória da banda do vermelho para a estação RD067.	39
Figura 23 – Trajetória da banda do infravermelho próximo para a estação RD067.	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Bandas do satélite Landsat 8.	22
Tabela 2 – Períodos analisados.....	28
Tabela 3 – Medições de clorofila <i>a</i> usando várias combinações de bandas espectrais. .	30
Tabela 4 – Medições de turbidez utilizando bandas espectrais.	30
Tabela 5 – Medições da profundidade do disco de Secchi usando combinação de bandas espectrais.	30

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
1.1.1 <i>Objetivo Geral</i>	11
1.1.2 <i>Objetivos Específicos</i>	11
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	12
2.1 RECURSOS HÍDRICOS NO BRASIL	12
2.2 PARÂMETROS DE QUALIDADE DE ÁGUA.....	13
2.2.1 <i>Clorofila a</i>	14
2.2.2 <i>Turbidez</i>	14
2.2.3 <i>Profundidade do Disco de Secchi</i>	15
2.3 GEOTECNOLOGIAS E SENSORIAMENTO REMOTO	16
2.3.1 <i>Sensoriamento Remoto Aplicado a Recursos Hídricos</i>	18
2.4 SATÉLITES ORBITAIS	20
2.4.1 <i>Satélites da Série Landsat</i>	20
2.5 PROCESSAMENTO DIGITAL EM NUVEM	22
3. MATERIAIS E MÉTODOS	24
3.1 ÁREA DE ESTUDO	24
3.2 MATERIAIS.....	25
3.3 AQUISIÇÃO DE DADOS	26
3.4 PROCESSAMENTO DAS IMAGENS LANDSAT	27
3.5 AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE QUALIDADE DE ÁGUA	29
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	32
5. CONCLUSÃO.....	40
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41
APÊNDICE A – Código Fonte Utilizado no Google Earth Engine.....	46
APÊNDICE B – Código Fonte Utilizado no R.....	50

1. INTRODUÇÃO

A utilização da água pela sociedade humana visa atender suas necessidades pessoais, econômicas (agrícolas e industriais) e sociais. No entanto, essa diversificação no uso da água, quando realizada de forma inadequada, provoca alterações na qualidade da mesma, comprometendo os recursos hídricos e por consequência, seus usos para fins diversos (SOUZA et al., 2014). Atualmente, estima-se que aproximadamente doze milhões de pessoas morrem anualmente por problemas relacionados com a qualidade da água (MERTEN e MINELLA, 2002).

A qualidade da água é aspecto indispensável quando se trata dos seus principais usos, especialmente para fins de abastecimento humano. Estes sofreram restrições significativas a partir da Resolução CONAMA nº357/2005, onde se estabeleceu condições de qualidade para o enquadramento dos corpos hídricos em território nacional, de acordo com os seus usos preponderantes, e para o lançamento de efluentes (CUNHA et al., 2013). Ainda assim, existe grande precariedade na fiscalização dos corpos hídricos quanto ações naturais e antrópicas, as quais alteram os aspectos de qualidade de água disponível para o uso humano.

Sendo a qualidade da água um conjunto de características físicas, químicas e biológicas, a quantidade e a natureza dos constituintes nela presentes variam principalmente conforme a natureza do solo de onde são originárias, das condições climáticas e do grau de poluição que lhes é conferido, especialmente pelos despejos municipais e industriais (SETTI et al., 2001).

Diante desse contexto, técnicas de sensoriamento remoto podem assumir um papel importante no auxílio do monitoramento de parâmetros de qualidade da água, podendo preencher lacunas espaciais e temporais. Estudos recentes demonstram o potencial do uso de técnicas de sensoriamento remoto na estimativa de parâmetros de qualidade da água (GHOLIZADEH, MELESSE e REDDI, 2016; MENDES e CIRILO, 2001; VENTURA, 2013).

Diferentes sensores a bordo de satélites medem quantidade de radiação em vários comprimentos de onda refletidos da superfície da água. Essas reflexões podem ser usadas direta ou indiretamente para detectar diferentes indicadores de qualidade da água, tais como concentração de clorofila-a, turbidez e profundidade do disco de *Secchi* (GHOLIZADEH, MELESSE e REDDI, 2016). O sensoriamento remoto óptico da qualidade da água está diretamente associado à coloração e a transparência da água, que são afetadas pelas substâncias nela presentes (VENTURA, 2013).

Formas mais simples e de menor custo na detecção de mudanças em padrões de qualidade de corpos hídricos seriam de grande importância para detectar possíveis problemas, sobretudo em águas direcionadas ao abastecimento humano, principalmente em épocas de escassez hídrica, onde a qualidade tende a ser comprometida.

As coletas de dados *in situ* são capazes de representar apenas estimativas pontuais da qualidade das condições da água no tempo e no espaço, e a obtenção de variações espaciais e temporais dos índices de qualidade em grandes corpos de água é quase impossível (GHOLIZADEH, MELESSE e REDDI, 2016).

Partindo desses princípios, a análise de parâmetros de qualidade de água através de técnicas de sensoriamento remoto pode ser uma ferramenta eficiente para o monitoramento da qualidade da água em corpos hídricos superficiais brasileiros, uma vez que estes possuem déficit de mão de obra técnica capaz de monitorar estes parâmetros periodicamente em campo.

Dessa forma, a viabilização de ferramentas de sensoriamento remoto para a análise de parâmetros de qualidade de água torna-se um aspecto extremamente atrativo e com inúmeros benefícios, especialmente nos dias atuais em que há grande disponibilidade de séries temporais de imagens de satélite e de ferramentas gratuitas para sua análise e processamento.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Este estudo tem como objetivo principal analisar parâmetros de qualidade da água (turbidez, clorofila *a* e profundidade do disco de Secchi) em corpos hídricos, utilizando técnicas de sensoriamento remoto.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Observar a eficiência do sensoriamento remoto para classificação de parâmetros de qualidade de água;
- Aperfeiçoar técnicas de avaliação de parâmetros de qualidade de água com imagens de satélite;
- Quantificar os resultados obtidos por sensoriamento remoto com base nos dados adquiridos em campo e verificar possíveis mudanças na qualidade da água;
- Identificar combinações espectrais mais adequadas para cada tipo de situação;

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 RECURSOS HÍDRICOS NO BRASIL

Os recursos hídricos são compreendidos como fontes de valor econômico essencial para a sobrevivência e desenvolvimento dos seres vivos. Eles são abundantes na natureza e por esse motivo durante muitos anos se pensou que a falta de água potável era impossível. A despreocupação com o recurso a partir do desenvolvimento da sociedade moderna, com a criação de grandes centros urbanos, deixaram de lado a preocupação com a sua contaminação, causando danos imensuráveis ao meio ambiente (KOBİYAMA, MOTA e CORSEUIL, 2008).

A água destinada ao abastecimento humano no Brasil deve atender aos padrões de potabilidade estabelecidos pela legislação (CONAMA nº357/2005). Por esse motivo, os responsáveis pelo serviço de abastecimento de água devem manter um controle da qualidade da água bruta e garantir a eficiência do processo de tratamento (SECRETARIA NACIONAL DE SANEAMENTO AMBIENTAL, 2007).

De acordo com a Agência Nacional das Águas (ANA), dentre os municípios brasileiros, 58% utilizam mananciais de águas superficiais de forma preponderante para o seu abastecimento, enquanto 42% têm, nos mananciais subterrâneos, suas principais fontes. Considerando os grandes centros urbanos do país, a representatividade dos mananciais superficiais é ainda maior, com 69% (EMPRESA BRASIL DE COMUNICAÇÃO, 2008).

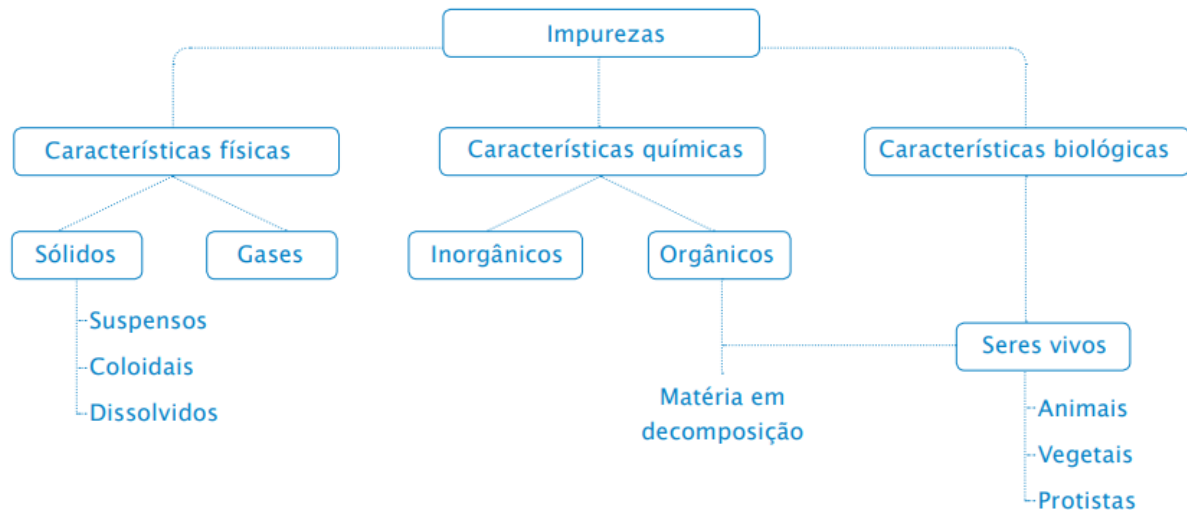
No Brasil, os potenciais de água doce são extremamente favoráveis para os mais diversos usos, porém as características de recurso natural renovável, em várias regiões do país, têm sido drasticamente afetadas por crises hídricas, decorrentes de longos períodos de estiagem e ineficácia da gestão dos órgãos responsáveis (KOBİYAMA, MOTA e CORSEUIL, 2008).

A água pode ter sua qualidade comprometida desde o manancial, pelo lançamento de efluentes e resíduos, exigindo maiores investimentos nas estações de tratamento e alterações na dosagem de produtos para se garantir a qualidade da água na saída das estações. No entanto, tem-se verificado que a qualidade da água decai no sistema de distribuição pela intermitência do serviço, pela deficiência da universalização dos serviços de esgotamento sanitário para toda população, pela obsolescência da rede de distribuição e pela manutenção muitas vezes ineficaz (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2006).

2.2 PARÂMETROS DE QUALIDADE DE ÁGUA

A qualidade da água pode ser representada através de diversos parâmetros, que podem ser expressos por meio de concentrações ou outros valores numéricos, representando características físicas, químicas e biológicas, conforme apresentado na Figura 1.

Figura 1 – Impurezas da água de acordo com suas características.



Fonte: VON SPERLING, 2005.

Quando existe necessidade de estudos específicos de qualidade de água em determinados trechos de corpos hídricos, visando diagnósticos mais detalhados, outras variáveis podem ser determinadas, tanto em função do uso e ocupação do solo na bacia contribuinte, quanto pela ocorrência de algum evento excepcional na área em questão (CETESB, 2003).

Reservatórios, por se tratarem de ambientes lânticos, são mais propícios a impactos na qualidade da água. A partir do represamento, o tempo de residência da água em um mesmo local aumenta consideravelmente (VILELA, 2010). A movimentação das substâncias presente na água é reduzida, acarretando em um baixo carreamento das águas, principalmente durante períodos de estiagem, onde a entrada de água no corpo hídrico é drasticamente reduzida, podendo chegar a zero em meses secos.

Apesar da necessidade de se monitorar a qualidade da água nas bacias hidrográficas, ações voltadas para esse tipo de análise ainda são escassas. O monitoramento é uma das grandes necessidades da gestão de recursos hídricos, tendo em vista o alto custo de recursos necessários para a sua instalação e manutenção (BOAS et al., 2015). Os órgãos gestores possuem estações fluviométricas e sedimentométricas. Entretanto, estas não são suficientes para atender as

necessidades de um país tão grande quanto o Brasil, tornando a gestão de bacias e recursos hídricos uma tarefa difícil e com elevado custo financeiro (VILELA, 2010).

2.2.1 *Clorofila a*

A clorofila *a* é um pigmento presente de forma universal em todos os grupos taxonômico de algas, sendo a concentração deste pigmento na água utilizada como indicador da biomassa ativa (CLARKE et al., 2006). Em ambientes lênticos, a clorofila *a*, juntamente com a luz e a distribuição de nutrientes, influenciam atividades fisiológicas das células do fitoplâncton, estas vem recebendo atenção nos estudos limnológicos dos últimos tempos, uma vez que representam as principais entradas de matéria orgânica e de energia potencial responsável pelo funcionamento do sistema (WETZEL, 1983).

As proliferações de algas, que são frequentemente induzidas por fenômenos de eutrofização em águas doces, estão diretamente relacionadas com a concentração de clorofila *a*, uma vez que são essenciais para a fotossíntese de plantas, algas e cianobactérias (GHOLIZADEH, MELESSE e REDDI, 2016). O estudo da comunidade biótica e da clorofila *a*, juntamente com parâmetros físicos e químicos, pode detectar possíveis alteração na qualidade das águas, assim como avaliar tendências temporais, que refletem modificações no habitat ou no comportamento dos organismos aquáticos (CÂMARA, 2007).

O método comumente utilizado para determinação da concentração de clorofila *a* em corpos hídricos é o do espectrofotométrico, normatizado pela Norma Técnica CETESB L5.306, que inclui etapas de coleta da amostra, filtragem das amostras, extração dos pigmentos, leitura em espectrofotômetro e cálculo das concentrações. Necessitando de equipamentos específicos e técnicos especializados e coleta de dados em campo para sua realização (CETESB, 2014).

2.2.2 *Turbidez*

Analisando processos erosivos superficiais ou de canal fluvial, dois parâmetros são afetados de forma mais acentuada: cor e turbidez. A turbidez, também conhecida como turvação, pode ser definida como o grau de redução que a luz sofre ao atravessar uma certa quantidade de água, devido à presença das partículas e substâncias que esta contém. Em sua maior parte, a turbidez é provocada pela ação das chuvas, que, por meio de seus caminhos de escoamento na superfície do solo, carregam partículas de argila e areia (PAVANELLI, 2001). O nível de turbidez é totalmente dependente da quantidade de partículas suspensas em uma

amostra de água. Quanto mais partículas suspensas, mais difícil a luz percorrer através da água e, portanto, maior a turbidez da água. A natureza complexa de substâncias suspensas na água altera a refletância do corpo de água e, portanto, causa variação na cor (GHOLIZADEH, MELESSE e REDDI, 2016).

O processo de tratamento da água geralmente é iniciado com a remoção dos materiais que flutuam ou estão suspensos nela. A presença de sedimentos está intimamente relacionada à composição, manejo, uso e transporte do elemento solo. Os sedimentos possuem importância significativa em estudos ambientais, uma vez que representam a capacidade de acumular espécies de microorganismos e de elementos químicos que se associam a materiais em suspensão, sendo transportados na forma dissolvida, ou por vezes, coloidal (LUÍZ, PINTO e SCHEFFER, 2012).

A análise de turbidez em corpos hídricos ocorre comumente pelo método nefelométrico, através de amostras coletadas em campo. Este método baseia-se na leitura da intensidade da luz dispersa pela amostra em ângulo de 90° com a direção da luz incidente em relação à intensidade da luz dispersa por uma suspensão padrão nas mesmas condições (VERÓL et al., 2005).

2.2.3 Profundidade do Disco de Secchi

O Disco de Secchi consiste em um disco circular branco ou com setores branco e preto preso ao centro por um cabo graduado, conforme apresentado na Figura 2. Este disco é mergulhado na água, sendo continuamente afundado até desaparecer completamente, essa primeira profundidade é anotada. Em seguida, o disco é levantado até sua completa visualização, esse segundo valor é também anotado. A profundidade do Disco de Secchi é dada, então, pelo valor médio da primeira e segunda profundidade obtida (POMPÊO, 1999). Medições do Disco de Secchi vem sendo muito utilizadas para inferir sobre a qualidade da água, indicando alterações no padrão sazonal da transparência da água, podendo servir de alerta às autoridades.

Figura 2 – O disco de Secchi.



Fonte: MILAN EQUIPAMENTOS, 2018.

A profundidade do Disco de Secchi corresponde a profundidade de transparência. A partir dessa medida, é possível estimar a profundidade da zona fótica, ou seja, a profundidade de penetração vertical da luz solar na coluna d'água, que indica o nível da atividade fotossintética de rios, lagos ou reservatórios (MARTINS et al., 2015).

Segundo Pompêo (1999), a transparência também apresenta relação com a concentração de clorofila. Entretanto, em corpos hídricos eutróficos com grandes aglomerados de cianobactérias, a transparência da água é maior do que a esperada para os valores de clorofila determinados. Sob essas condições o disco de Secchi poderá apresentar valores elevados, subestimando as condições do reservatório.

Os parâmetros discutidos possuem potencial para alterar características visuais da água, acarretando em mudanças nas propriedades de absorção e reflexão da luz. Dessa forma, avaliações através de técnicas de sensoriamento remoto tornam-se possíveis, através da quantificação das mudanças ocorridas nos comprimentos de onda referentes a reflexão de corpos hídricos (JESSEN, 2009).

2.3 GEOTECNOLOGIAS E SENSORIAMENTO REMOTO

O estudo do espaço geográfico e dos aspectos ambientais nele inseridos implica uma série de conhecimentos e informações que podem ser trabalhadas de maneira mais ágil, simples e rápida com as novas tecnologias. As geotecnologias podem ser entendidas como novas tecnologias ligadas às geociências, as quais trazem avanços significativos no desenvolvimento

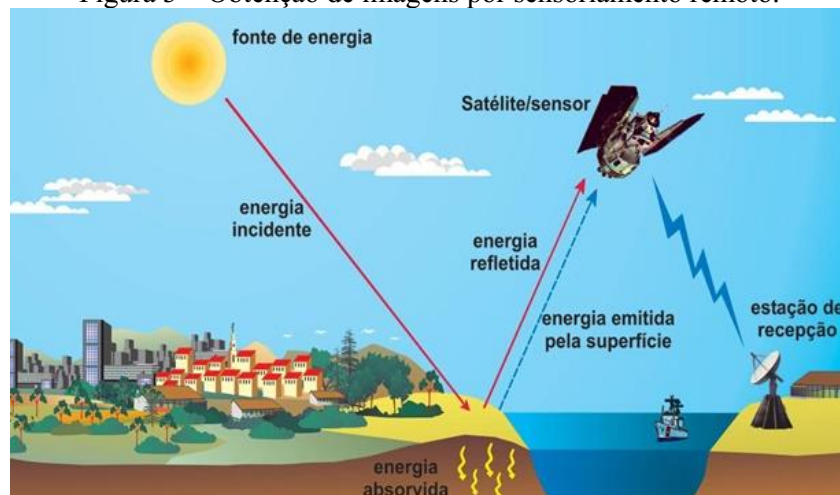
de pesquisas, em ações de planejamento, em processos de gestão, manejo e em tanto outros aspectos relacionados à estrutura do espaço geográfico (FITZ, 2008).

Sensoriamento remoto é uma técnica de obtenção de informação dos objetos a partir da detecção e mensuração que um determinado objeto impõe aos campos de força que os circundam, sejam esses campos eletromagnéticos, acústicos ou potenciais (ELACHI e ZYL, 2006). A condição principal imposta por essa definição clássica, que é o sensor estar a uma distância remota do objeto, estabelece a base para definir o sensoriamento remoto numa concepção um pouco mais científica, que é regida segundo os seguintes preceitos (MENESES e ALMEIDA, 2012):

- i. Exigência: ausência de matéria no espaço entre o objeto e o sensor;
- ii. Consequência: a informação do objeto é possível de ser transportada pelo espaço vazio;
- iii. Processo: o elo de comunicação entre o objeto e o sensor é a radiação eletromagnética, a única forma de energia capaz de se transportar pelo espaço.

O sensoriamento remoto pode ser analisado como um grande sistema de aquisição de informações. Esse sistema é subdividido em dois subsistemas: subsistema de aquisição de dados e subsistema de produção de informações. O primeiro subsistema é formado pela fonte de radiação, plataforma (satélite, aeronave), sensor e centro de dados, a representação simplificada desse subsistema está ilustrada na Figura 3. O subsistema de produção de informações é composto pelo sistema de aquisição de informações de solo para calibragem dos dados de sensoriamento remoto, sistema de processamento de imagens e sistema de geoprocessamento (NOVO, 2008).

Figura 3 – Obtenção de imagens por sensoriamento remoto.



Fonte: FLORENZANO, 2007.

A disponibilidade de várias bandas espectrais permite a exploração mais eficiente das características espectrais dos alvos, em conjunto com os modos de operação dos diversos sistemas sensores. Quanto mais bandas espectrais dispuserem um sistema sensor, mais informações ele fornecerá (SILVA et al., 2009). Diversos tipos de agrupamento entre bandas vêm sendo desenvolvidos como as razões simples de normalizações e distâncias no espaço cartesiano e suas variantes, em geral realçam o componente espectral e se correlacionam com parâmetros biofísicos (EIPHANIO et al., 1996).

As informações obtidas por sensoriamento remoto através de satélites fornecem dados de observação com alta frequência temporal e alta resolução espacial, que cobrem praticamente toda a área da superfície terrestre e podem ser utilizadas para complementar áreas com poucos dados de campo disponíveis (LIU, 2007).

2.3.1 Sensoriamento Remoto Aplicado a Recursos Hídricos

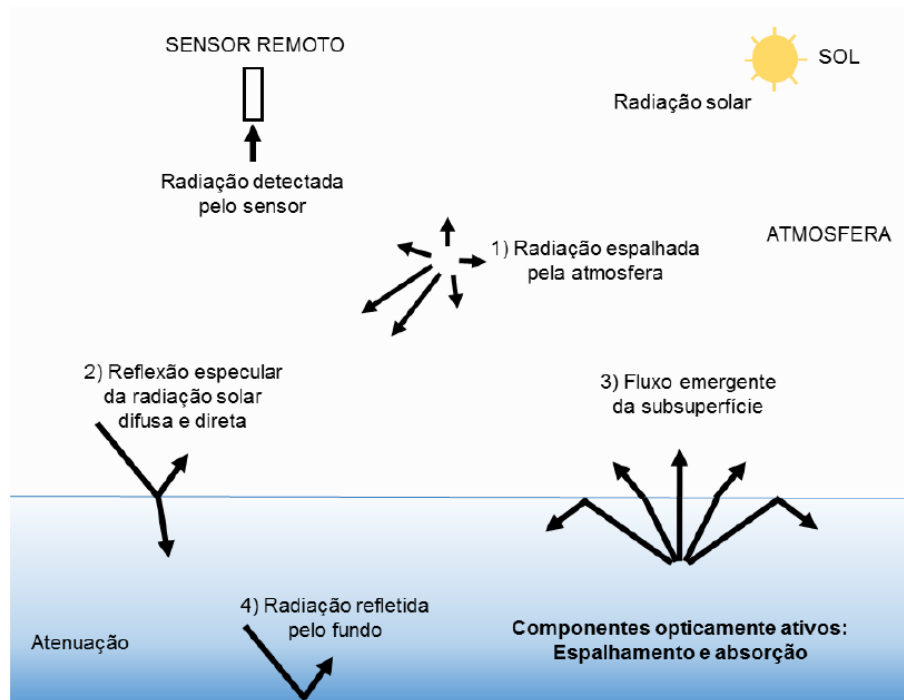
Os processos hidrológicos variam rapidamente no espaço e no tempo. As informações de sensoriamento remoto via satélite fornecem os dados de observação com elevada frequência temporal e alta resolução espacial, que cobrem uma imensa área e podem ser usadas para complementar áreas com poucos dados de medições em campo disponíveis (LIU, 2007).

No âmbito da análise de recursos hídricos, o impacto decorrente da alteração do uso do solo reflete-se em todos os componentes do ciclo hidrológico, como no escoamento superficial, na recarga dos aquíferos, na qualidade da água e no transporte de sedimentos (MENDES e CIRILO, 2001).

O sensoriamento remoto pode ser usado para catalogar e monitorar a extensão espacial, os constituintes orgânicos e inorgânicos, a profundidade e a temperatura da água de rios, lagos, reservatórios, mares e oceanos (JENSEN, 2009). Um dos índices mais utilizados para quantificar corpos hídricos é o Índice Normalizado de Diferença de Água (*“Normalized Difference Water Index”*- NDWI), proposto por Gao (1996), que relaciona a razão entre a diferença entre as bandas do verde e infravermelho próximo com a somatória destas.

Segundo Jensen (2009), a investigação de sensoriamento remoto aplicado a corpos hídricos, especificamente na análise da qualidade da água, se dá através do comportamento da água pura, analisando a forma que esta absorve e/ou espalha a radiação incidente, para poder verificar a diferença do comportamento da radiação incidente em águas que possuem materiais orgânicos e inorgânico, conforme ilustrado na Figura 4.

Figura 4 – Radiação detectada por um sensor remoto acima de um corpo de água.



Fonte: ANDRADE, 2016.

A radiação solar direta e difusa penetra na superfície da água e sofrem diminuição por um conjunto de efeitos, dentre eles a absorção e espalhamento da água pura e absorção, refração e espalhamento das partículas suspensas (LIU, 2007). Vários parâmetros devem ser considerados para a aplicação dos dados obtidos via satélite no monitoramento da qualidade da água, conforme listados a seguir (MOORE, 1978):

- i. Radiação solar incidida e refletida que varia com a latitude, dia, ângulo zenital solar e ângulo de visada do sensor do satélite;
- ii. Interferência pelos constituintes atmosféricos, incluindo aerossóis, água e moléculas;
- iii. A superfície rugosa da água pode produzir mais reflectâncias peculiares que a superfície suave.
- iv. As boias, os filmes, as espumas, os detritos, as plantas e os animais flutuando na superfície da água podem alterar as reflectâncias registradas pelos sensores do satélite;
- v. A cor da água alterada pelas matérias dissolvidas pode absorver mais a energia solar na água;
- vi. A turbacão da água pode aumentar a energia do retroespalhamento ocasionada pela concentração, tamanho, forma e índice de refração das partículas suspensas. As

partículas suspensas incluem sedimentação inorgânica, fitoplanctons, zooplânctos e outros;

- vii. Espalhamento e reflectância múltiplas que são difíceis de interpretar;
- viii. Profundidade e as sedimentações no fundo do lago;
- ix. As vegetações submersas e emersas podem alterar as características espectrais.

A aplicação de técnicas de sensoriamento remoto mostra um grande potencial no planejamento e administração de recursos hídricos. Diversas técnicas podem ser abordadas através de respostas obtidas por sensores de satélites orbitais, algumas com maior profundidade, outras de maneira mais superficial, de acordo com o tipo de análise e objetivo a ser abordado (MENDES e CIRILO, 2001).

2.4 SATÉLITES ORBITAIS

Os satélites orbitais, fazem parte do dia-a-dia da vida moderna, tornando-se cada vez mais frequentes. Esses satélites são construídos para diversas finalidades: telecomunicação, espionagem, experimentos científicos, meteorologia e observação da superfície terrestre (FLORENZANO, 2007).

Existe variação quanto ao padrão orbital dos satélites em relação à Terra. Os que mais interessam para o sensoriamento remoto enquadram-se em duas grandes categorias: os de órbita baixa (altitude inferior a 1.000km) e os de órbita alta. Estes últimos são os geoestacionários e têm maior aplicabilidade em pesquisas meteorológicas, enquanto os de órbita baixa englobam a maioria dos satélites de sensoriamento remoto (EPIPHANIO, 2002). Os principais satélites utilizados no Brasil, especialmente os voltados para o sensoriamento remoto da superfície terrestres são o Landsat, SPOT, NOAA, Terra, Radarsat e ERS, o CBERS e o SSR/MECB (FLORENZANO, 2008).

2.4.1 Satélites da Série Landsat

A série Landsat (Land Remote Sensing Satellite), iniciou em 1972 com o lançamento do satélite ERTS-1. Tendo sequência com os satélites Landsat 2, 3, 4 e sobretudo com o Landsat 5, 7 e 8. O principal objetivo do sistema Landsat foi o mapeamento multispectral em alta resolução da superfície da Terra (EMBRAPA, 2008).

Os dados Landsat oferecem um registro exclusivo da superfície terrestre e sua modificação ao longo do tempo. A resolução espacial moderada do Landsat é suficientemente

resolvida para permitir a cronologia de mudanças antropogênicas e naturais a escala local a global e as séries temporais de dados são calibradas para fornecer um registro consistente e caracterizado que permitir a discriminação entre artefatos de dados e mudanças temporais reais da superfície terrestre (ROY, 2014).

Os resultados gerados e aplicações abordadas com os dados Landsat envolvem descoberta científica, gerenciamento e monitoramento de recursos para a qualidade econômica e ambiental, saúde pública e bem-estar humano e segurança nacional. As análises dos benefícios econômicos da Landsat variam anualmente entre US \$ 935 milhões a US \$ 2,19 bilhões (MILLER, 2013).

As imagens de satélite Landsat 8 possuem menor interferência de ruídos que os sensores passados da série e fornecem informações da Terra a cada 16 dias, podendo considerar 8 dias se compensados a partir de imagens Landsat 7. A informação recolhida pelos instrumentos a bordo do satélite a partir do seu pleno funcionamento, em abril de 2013, está disponível para download sem custo a partir do EarthExplorer, GloVis ou LandsatLook (USGS, 2018).

O Landsat 8 mede diferentes faixas de frequências ao longo do espectro eletromagnético, embora não seja necessariamente uma cor visível para o olho humano. Cada faixa é denominada de banda, o Landsat 8 possui 11 bandas, destas apenas aquelas com os comprimentos de onda mais curtos (faixas 1-4 e 8) detectam a luz visível - todas as outras estão em partes do espectro que não se pode ver, a resolução espacial das bandas variam entre 15 e 100m (LOYD, 2013), o comprimento de onda (μm) e resolução referente a cada banda está exposto na Tabela 1.

Tabela 1 – Bandas do satélite Landsat 8.

Número da Banda	Descrição	μm	Resolução
1	Aerosol, costeira	0.433 - 0.453	30 m
2	Azul	0.450 - 0.515	30 m
3	Verde	0.525 - 0.600	30 m
4	Vermelho	0.630 - 0.680	30 m
5	Infravermelho próximo	0.845 - 0.885	30 m
6	SWIR 1	1.560 - 1.660	30 m
7	SWIR 2	2.100 - 2.300	30 m
8	Pancromático	0.500 - 0.680	15 m
9	Cirrus	1.360 - 1.390	30 m
10	Infravermelho Térmico 1	10.6 - 11.2	100 m
11	Infravermelho Térmico 2	11.5 - 12.5	100 m

Fonte: LOYD, 2013.

2.5 PROCESSAMENTO DIGITAL EM NUVEM

A computação em nuvem, também conhecida como *Cloud Computing*, é um novo modelo de computação que permite ao usuário final acessar uma grande quantidade de aplicações e serviços, independente do lugar ou plataforma, bastando para isso ter acesso a um terminal conectado à internet (SILVA, 2010). A nuvem é representada pela internet, sendo a infra-estrutura de comunicação composta por um conjunto de hardwares, softwares, interfaces, redes de telecomunicação, dispositivos de controle e de armazenamento que permitem a entrega da computação como serviço (HURWITZ *et al.*, 2010).

Seguindo essa tendência, em 2010 foi lançado o Google Earth Engine, uma plataforma em nuvem para análise geoespacial em escala planetária, que oferece as capacidades computacionais do Google para lidar com uma variedade de questões sociais de alto impacto, incluindo desmatamento, seca, desastres, doenças, segurança alimentar, gerenciamento de água, clima monitoramento e proteção ambiental (GORELICK *et al.*, 2017). O catálogo de dados públicos Google Earth Engine é composto por imagens de sensoriamento remoto, incluindo os arquivos Landsat, assim como séries completas do satélite Sentinel, para o mapeamento e o monitoramento da cobertura vegetal e uso da terra, também inclui previsões climáticas, dados

de cobertura do solo e muitos outros dados ambientais, que podem ser manipulados a partir do editor de códigos utilizando a linguagem de programação *Javascript*.

As possibilidades oferecidas pelo Google Earth Engine de analisar dados de sensoriamento remoto detectados em uma escala global com o poder do processamento em nuvem é substancial, descartando a necessidade do *download* das imagens de satélite. A inclusão contínua de dados aliada a ferramentas de classificação e poder de processamento permitem novas maneiras de mapear o planeta, tornando a plataforma extremamente eficaz se comparada aos métodos de processamento digital de imagens tradicionalmente utilizados (PATEL *et al.*, 2015).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 ÁREA DE ESTUDO

O Rio Doce é um dos principais rios do território brasileiro, banhando os estados de Minas Gerais e Espírito Santo, com 853km de extensão, representa a bacia hidrográfica mais importante incluída totalmente na Região Sudeste, possuindo aproximadamente 86.715km². A população residente na bacia do Rio Doce encontra-se distribuída em 229 municípios, sendo 203 mineiros e 26 capixabas, possuindo em 2010 uma população estimada em 3,3 milhões de pessoas (ANA, 2017).

No dia 05 de novembro de 2015, uma barragem de rejeitos da mineradora Samarco¹, conhecida como Barragem de Fundão, controlada pelas empresas Vale² e BHP Billiton³, se rompeu. Segundo dados do Greenpeace (2016), foram despejados 40 bilhões de litros de rejeitos de minério em 700 km da bacia do Rio Doce, conforme ilustrado na Figura 5. A onda de lama varreu do mapa o distrito de Bento Rodrigues, matando 19 pessoas e atingindo diretamente toda a população a jusante da barragem, além de destruir a fauna e a flora da região, caracterizando o maior desastre ambiental já registrado no Brasil.

Figura 5 – Visão espacial do curso do rio afetado pelo desastre.



Fonte: Portal G1, 2015.

¹Samarco Mineração S.A. é uma mineradora brasileira fundada em 1977 e atualmente controlada através de uma joint-venture entre a Vale S.A. e a anglo-australiana BHP Billiton.

²Vale é uma mineradora multinacional brasileira e uma das maiores operadoras de logística do país.

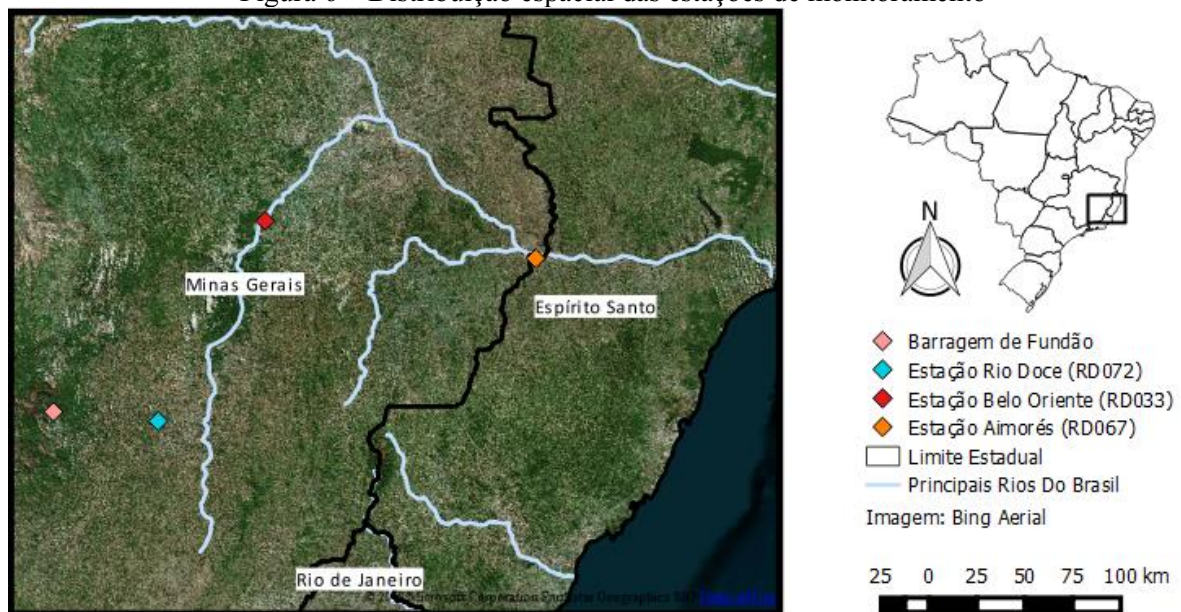
³BHP Billiton é uma mineradora e petrolífera anglo-australiana multinacional sediada em Melbourne, Austrália. Em 2013, era a maior empresa de mineração do mundo em termos de receitas.

Imediatamente após a tragédia, foi criada a Fundação Renova, com a missão de implementar e gerir os programas de reparação dos impactos do rompimento da barragem de Fundão. Segundo Waack (2018), diretor da Fundação, para reparar todas as consequências do rompimento da barragem serão necessários de 5 a 10 anos, mas recuperar o desastre silencioso que ocorreu ao longo dos últimos 100 anos é um aspecto mais complexo.

A partir da repercussão mundial da tragédia, o IGAM (Instituto Mineiro de Gestão das Águas) distribuiu espacialmente diversos pontos de monitoramento no Rio Doce, com o objetivo de avaliar os resultados das políticas de recuperação, sendo hoje a bacia mais monitorada do Brasil. Possuindo 92 pontos de monitoramento da qualidade da água, sendo 22 estações de monitoramento automático que liberam 80 parâmetros por minuto, onde alguns desses dados são disponibilizados ao público via internet (IGAM, 2017).

Analisando a distribuição espacial e a disponibilidade dos dados fornecidos pela ANA, foram escolhidas três estações de monitoramento ao longo do Rio Doce (Figura 6), sendo elas: Belo Oriente (RD033), Aimorés (RD067) e Rio Doce (RD072).

Figura 6 – Distribuição espacial das estações de monitoramento



3.2 MATERIAIS

- Imagens do satélite Landsat 8 (no período compreendido entre 2013 a 2018), totalizando 344 imagens;
- Dados de monitoramento disponibilizados através da Sala de Situação da ANA (<http://www3.ana.gov.br/portal/ANA/sala-de-situacao/>).
- Programa Google Earth® (Google Systems);

- Plataforma Google Earth Engine
- Software Qgis¹ 3.0 (apenas para visualização de imagens);
- Software R²;
- Interface RStudio;

3.3 AQUISIÇÃO DE DADOS

Para a realização desse estudo foram utilizadas imagens selecionadas do sensor Operational Land Imager - OLI, satélite Landsat 8. Estas são disponibilizadas gratuitamente pelo Serviço Geológico Americano - U.S. Geological Survey – USGS através da plataforma em nuvem Google Earth Engine.

As imagens Landsat foram avaliadas com o intuito de obter a série com o menor número de interferências de nuvens, com a finalidade de gerar composições que indiquem correlações coerentes com os parâmetros de qualidade de água a serem analisados (clorofila *a*, turbidez e profundidade do disco de Secchi).

O uso do satélite Landsat 5 foi descartado, uma vez que este foi desativado em 2013, não possuindo a série temporal necessária para a análise do desastre ocorrido na área de estudo. A presença de ruídos é expressiva em praticamente todas as imagens do satélite Landsat 7, tornando seus resultados pouco expressivos se for levar em consideração áreas de pequenas dimensões. Dessa forma, o conjunto de imagens que mais se adequou as necessidades do estudo foram as de reflectância da superfície, fornecidas pelo satélite Landsat 8, que se encontra em órbita desde 2013, fornecendo imagens com qualidade superior ao seu antecessor.

Para correlacionar os dados obtidos por sensoriamento remoto com os medidos em campo, foram utilizadas planilhas de dados de qualidade de água fornecidas pela Sala de Situação da ANA (portal que possui dados de monitoramento para os principais rios, reservatórios e bacias hidrográficas do país), para cada estação analisada. As mesmas dispõem da média histórica e dados diários para o mês subsequente ao desastre, informando parâmetros como turbidez, sólidos totais, oxigênio dissolvido e condutividade.

¹QGIS é um software livre com código-fonte aberto, multiplataforma de sistema de informação geográfica que permite a visualização, edição e análise de dados georreferenciados.

²R é um ambiente de software livre para computação estatística e gráficos. Ele compila e é executado em uma ampla variedade de plataformas UNIX, Windows e MacOS.

3.4 PROCESSAMENTO DAS IMAGENS LANDSAT

O processamento das imagens foi feito através da plataforma Google Earth Engine (<https://code.earthengine.google.com>), utilizando a linguagem de programação *Javascript*. Inicialmente foi aplicado um filtro para a remoção de ruídos, nuvens e sombras de nuvens, já que estes são capazes de sobrepor dados do corpo hídrico. Uma vez livre de fatores que possam mascarar os resultados, a imagem passou por processos de combinação de bandas, para geração de resultados que identifiquem da forma mais precisa possível o comportamento dos parâmetros analisados.

Com o intuito de abranger uma área mais expressiva a partir de cada estação de monitoramento, foi criado um *buffer* (raio de abrangência) de aproximadamente 2,2km partindo do ponto onde se localiza cada estação, exemplificado na Figura 7. Devido a escassez de imagens úteis (imagens que possuem uma quantidade representativa de pixels), uma vez que muitas ficam inutilizáveis após o filtro de ruídos, optou-se por trabalhar com médias temporais, englobando períodos de interesse para o estudo, conforme detalhado na Tabela 2.

Figura 7 – Área de abrangência considerada para cada estação de monitoramento.

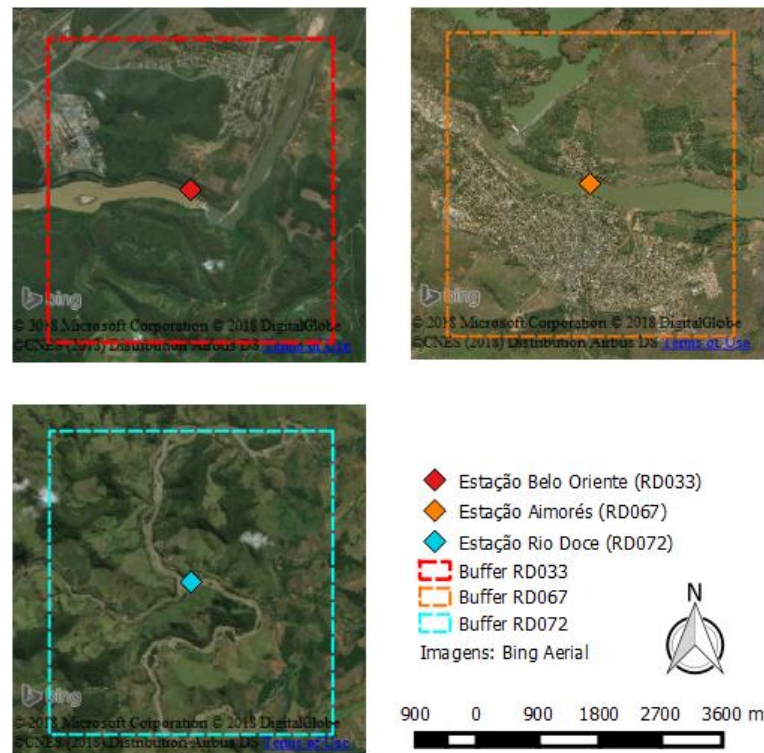
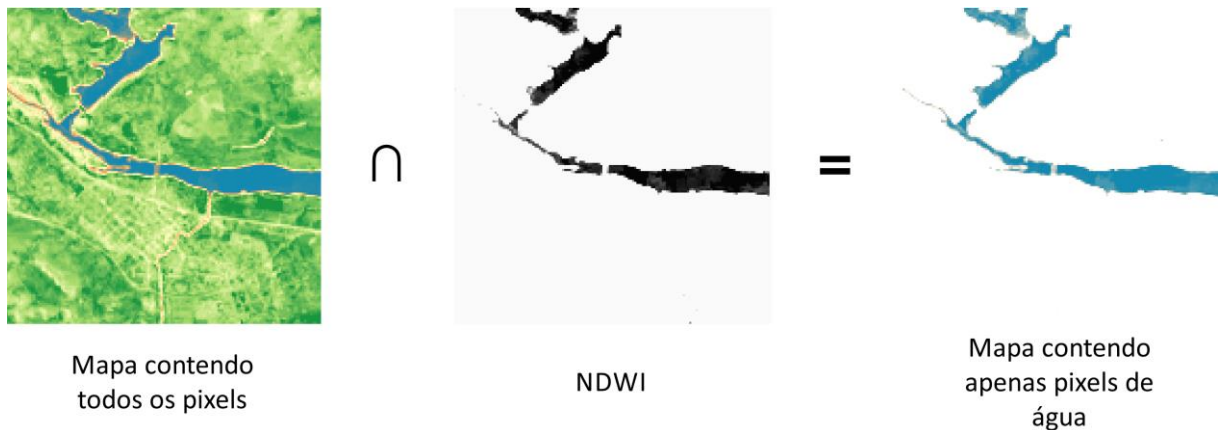


Tabela 2 – Períodos analisados.

Período	Característica de Interesse	Quantidade de Imagens
01/01/ 2013 a 31/10/2015	Série histórica disponível antes da ocorrência do desastre, caracterizando dados de qualidade de água conforme a média histórica.	45
01/11/2015 a 01/02/2016	Período de ocorrência e alta propagação das consequências do desastre.	5
01/11/2017 a 01/02/2018	Dois anos após o período de ocorrência do desastre.	3

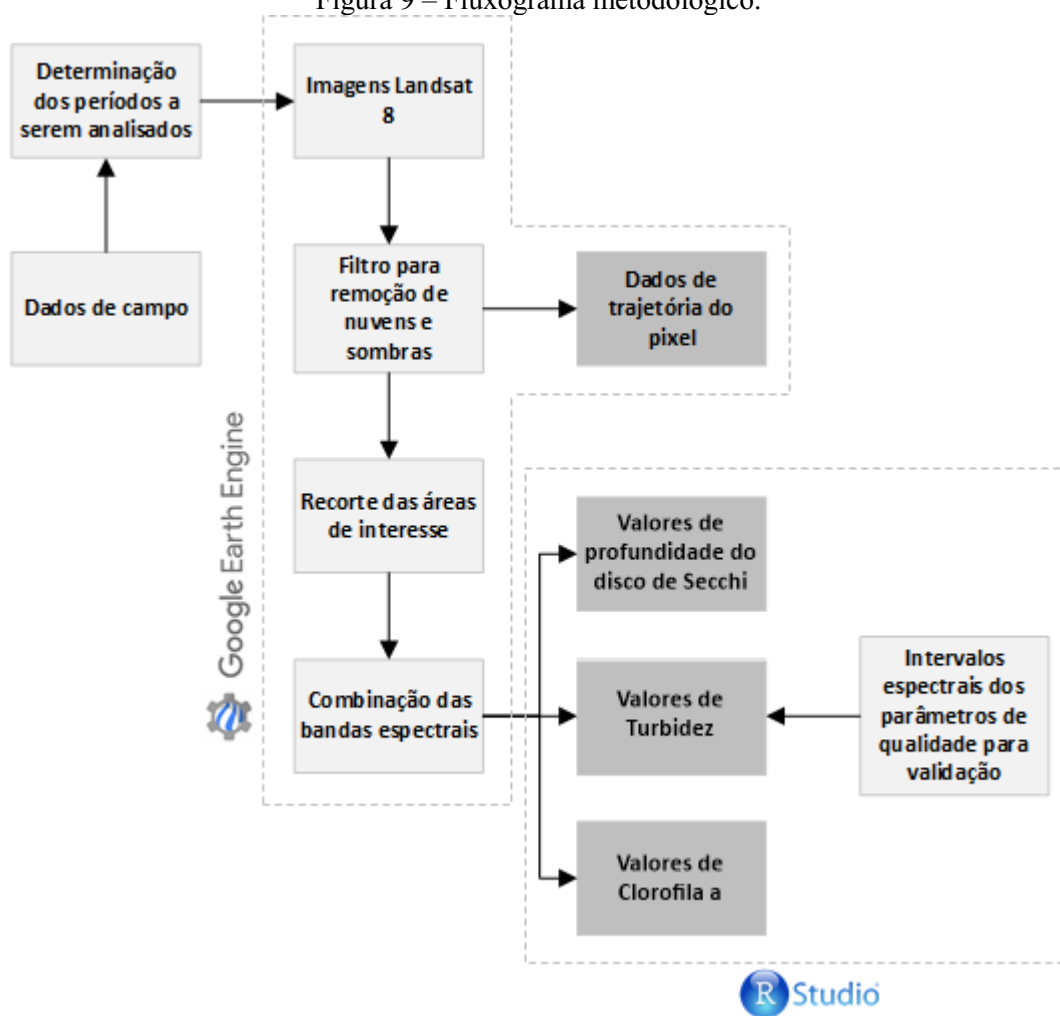
Após a obtenção dos mapas para cada período de interesse nas estações de monitoramento analisadas, todos os pixels correspondentes ao corpo hídrico foram extraídos, através NDWI, seguindo o procedimento ilustrado na Figura 8.

Figura 8 – Interseção entre mapa do período e NDWI.



Os pixels referentes a água tiveram sua média, variância e desvio padrão calculados. Por fim, foi extraída a trajetória do pixel onde se localiza cada estação no período de janeiro de 2013 a janeiro de 2018 para todas as bandas que constituem o Landsat 8, esse processo teve como objetivo identificar de forma mais precisa períodos de alteração na qualidade da água. A metodologia a ser adotada e seus respectivos ambientes de processamento está ilustrada de forma simplificada na Figura 9.

Figura 9 – Fluxograma metodológico.



3.5 AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE QUALIDADE DE ÁGUA

A avaliação dos parâmetros via sensoriamento remoto foi feita conforme a análise realizada por Gholizadeh, Melesse e Reddi (2016), onde diversos parâmetros de qualidade de água foram avaliados a partir de suas assinaturas espectrais para os sensores do Landsat 5 e 7, a partir da correlação existente entre um determinado parâmetro e uma combinação de bandas espectrais. A partir do intervalo espectral estabelecido para os sensores abordados, as combinações adotadas para o Landsat 7 foram adaptadas para o sensor OLI, do Landsat 8, descritas nas Tabelas 3,4 e 5.

Várias bandas espectrais visuais e suas relações são amplamente utilizadas para quantificar a clorofila *a*. As relações de banda espectral podem reduzir as influências da irradiância, da superfície atmosférica e da água do ar no sinal detectado remotamente, conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Medições de clorofila *a* usando várias combinações de bandas espectrais.

Combinação de Bandas	Satélite
Relação entre verde (0,50 a 0,60 μm) e vermelho (0,60 a 0,70 μm)	Landsat 8
Relação entre verde e azul	Landsat 8
Razão entre azul (0,40 a 0,50 μm) e vermelho (0,60 a 0,70 μm)	Landsat 8

As técnicas de sensoriamento remoto são amplamente utilizadas (ANDRADE, 2016; CLARKE, SPEIRS et al., 2006; CUNHA, CALIJURI et al., 2013) para estimar e mapear a turbidez e concentrações de partículas suspensas, além de fornecer suas variações espaciais e temporais. A teoria mostra que o uso de uma única banda fornece um algoritmo robusto e sensível ao parâmetro, assim como a combinação de algumas bandas do sensor, desde que a banda seja escolhida apropriadamente. As combinações estão representadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Medições de turbidez utilizando bandas espectrais.

Combinação de Bandas	Satélite
Usando uma única banda	Infravermelho próximo (0,75 a 0,90 μm) Landsat 8
	Vermelho (0,60 a 0,70 μm) Landsat 8

A profundidade do disco de Secchi tem uma correlação significativa com a reflectância de satélites corrigida atmosféricamente. Na banda verde a profundidade do disco de Secchi está relacionado à refletância logo abaixo da superfície, incorporando a razão de retroespalhamento aos coeficientes de espalhamento total para partículas suspensas, as combinações a serem utilizadas estão ilustradas na Tabela 5.

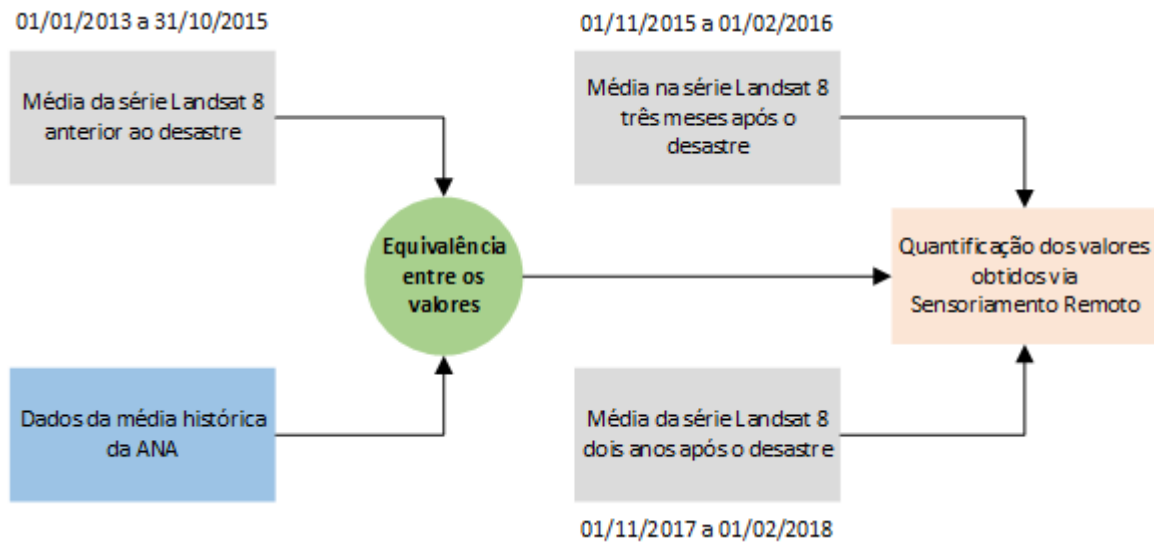
Tabela 5 – Medições da profundidade do disco de Secchi usando combinação de bandas espectrais.

Combinação de Bandas	Satélite
Relação entre azul (0,40 a 0,50 μm) e verde (0,50 a 0,60 μm)	Landsat 8

A partir das combinações apresentadas, os resultados de turbidez e transparência da água (obtido através da profundidade do disco de Secchi) foram quantificados conforme o fluxograma ilustrado na Figura 10. Onde a partir das médias históricas concedidas pela ANA,

o valor médio da operação de bandas para o primeiro período (01/01/2013 a 31/10/2015) foi equiparado a média histórica disponibilizada. Os demais períodos tiveram seus valores calculados a partir de regra de três simples com a correlação anterior.

Figura 10 – Metodologia para quantificação dos resultados obtidos via Sensoriamento Remoto.



4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os dados analisados de clorofila *a*, partindo do período anterior ao desastre, indicaram uma grande variabilidade nos períodos seguintes. Os resultados que foram obtidos para as três estações de tratamento estão indicados nas Figuras 11,12 e 13.

Figura 11 – Valores e variabilidade da clorofila *a* para a estação RD072.

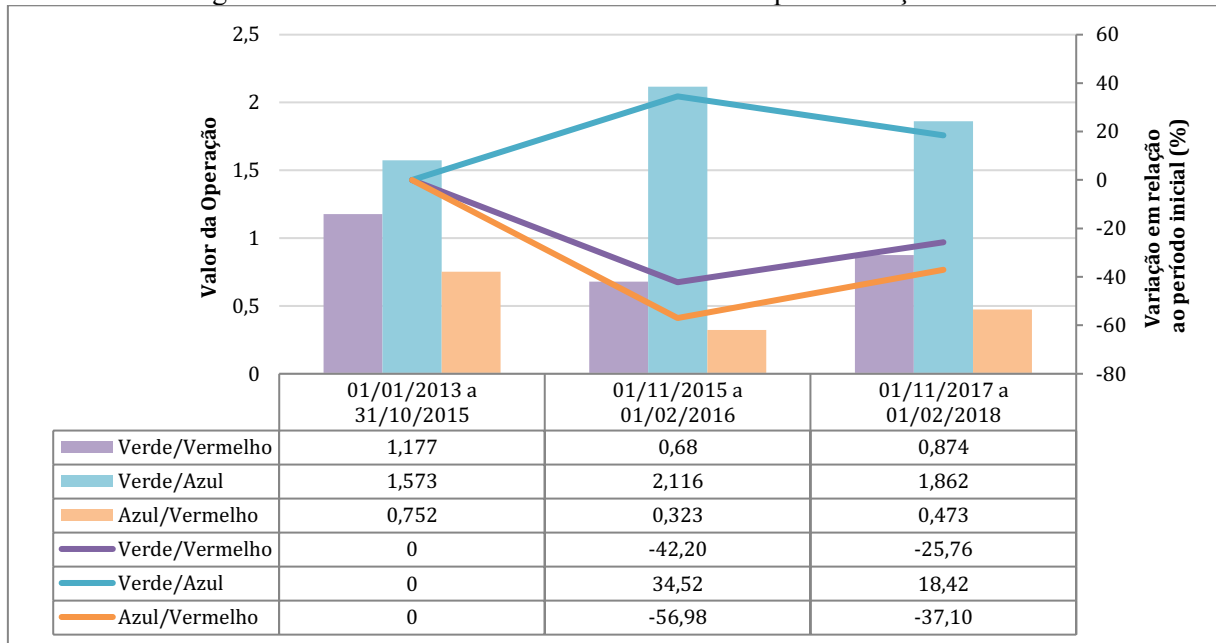


Figura 12 – Valores e variabilidade da clorofila *a* para a estação RD033.

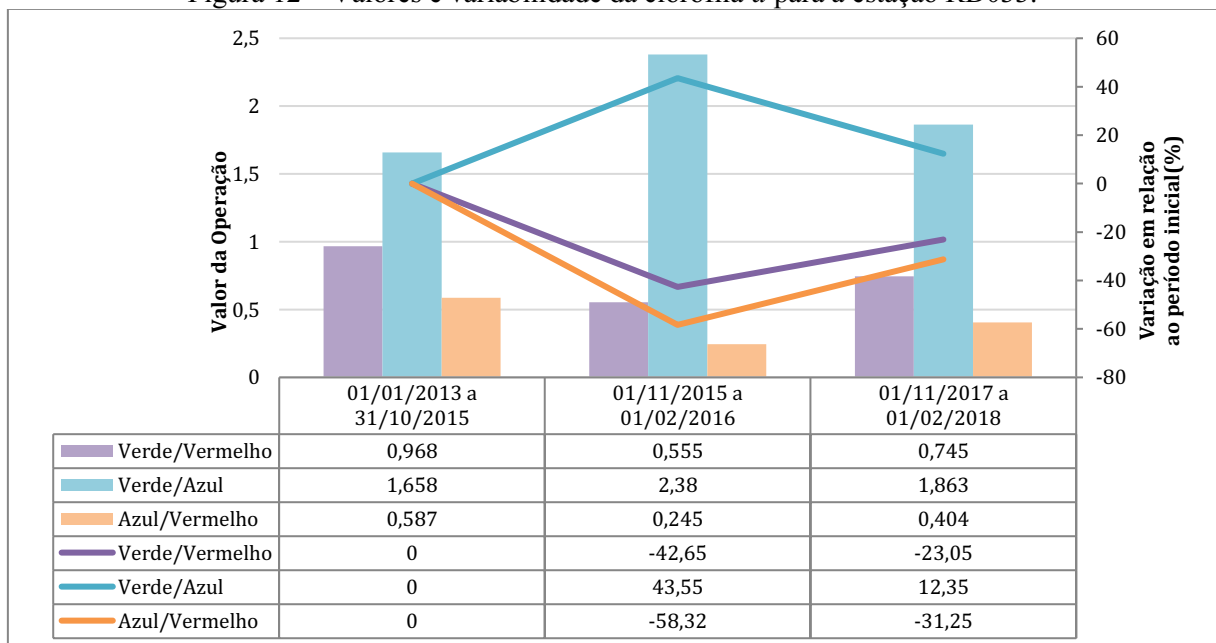
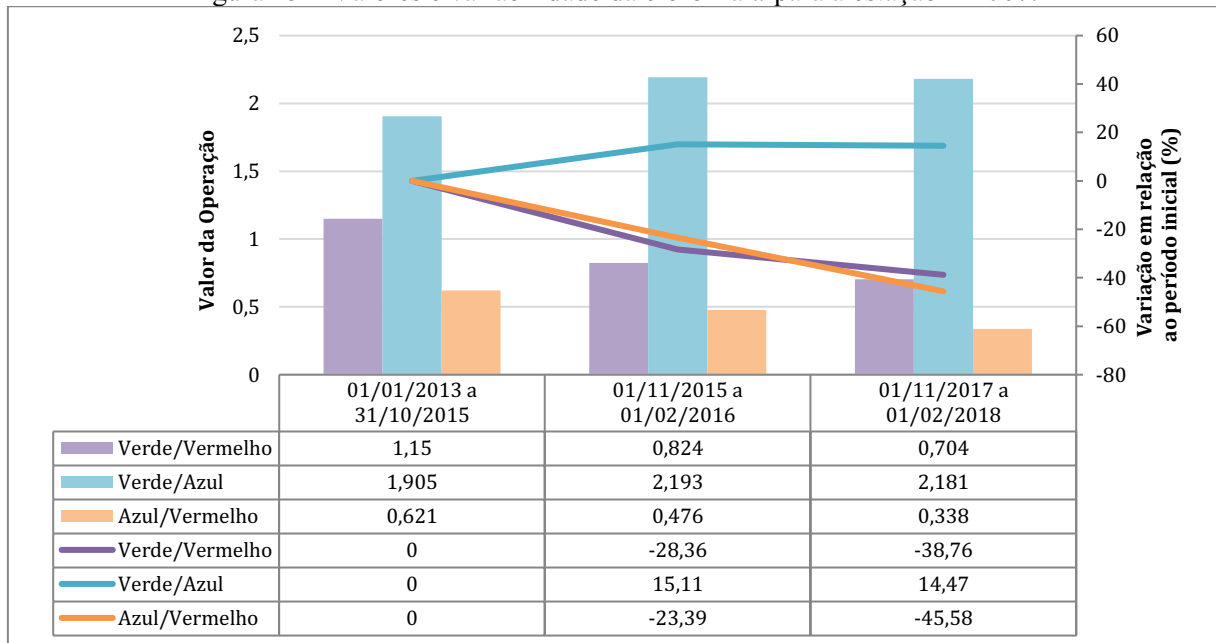
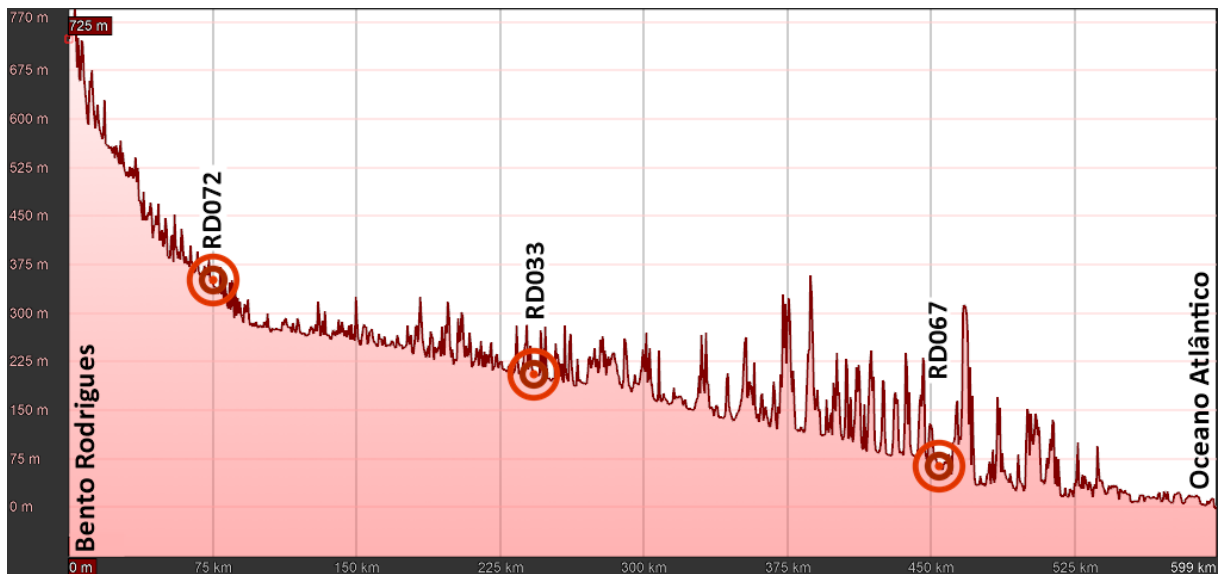


Figura 13 – Valores e variabilidade da clorofila *a* para a estação RD067.

Analisando as Figuras 11, 12 e 13, notam-se facilmente grandes mudanças ocorridas no período do desastre, exposta pela alta variação após o período inicial, é interessante observar a variação na estação RD067, esta ocorre de forma mais acentuada no terceiro período. Uma vez que se apresenta mais distante da área de rompimento da barragem, espera-se que leve mais tempo para receber as águas poluídas e, conseqüentemente, sofrer a influência do desastre. Além disso, fatores topográficos do terreno, como a inclinação, afetam diretamente a velocidade do fluxo da água, deixando-a retida por mais tempo em alguns pontos, conforme ilustrado na Figura 14.

Figura 14 – Perfil de elevação da trajetória do desastre (elaborado a partir do perfil topográfico fornecido pelo Google Earth).



Infelizmente a quantificação dos resultados de clorofila *a* se torna impossível, uma vez que as estações analisadas não dispõem de dados referentes a esse parâmetro. Dessa forma, a partir da análise do desvio padrão e variância dos pixels extraídos, nota-se que a relação verde/azul apresenta uma maior sensibilidade a possíveis mudanças no padrão do corpo hídrico, uma vez que apresenta os maiores desvios padrão e variância se comparada as relações verde/vermelho e azul/vermelho, estas por sua vez possuem uma sensibilidade extremamente próxima, chegando a desvios médios até três vezes menores que a relação verde/azul.

Os valores quantificados da turbidez para as bandas do infravermelho próximo e do vermelho estão ilustrados nas Figuras 15 e 16, respectivamente. Conforme já explicado, os valores do primeiro período foram equiparados a série histórica, dessa forma, as colunas em azul representam os dados referentes a média histórica disponibilizada pela ANA.

Figura 15 – Valores de turbidez estimados utilizando a banda do infravermelho próximo.

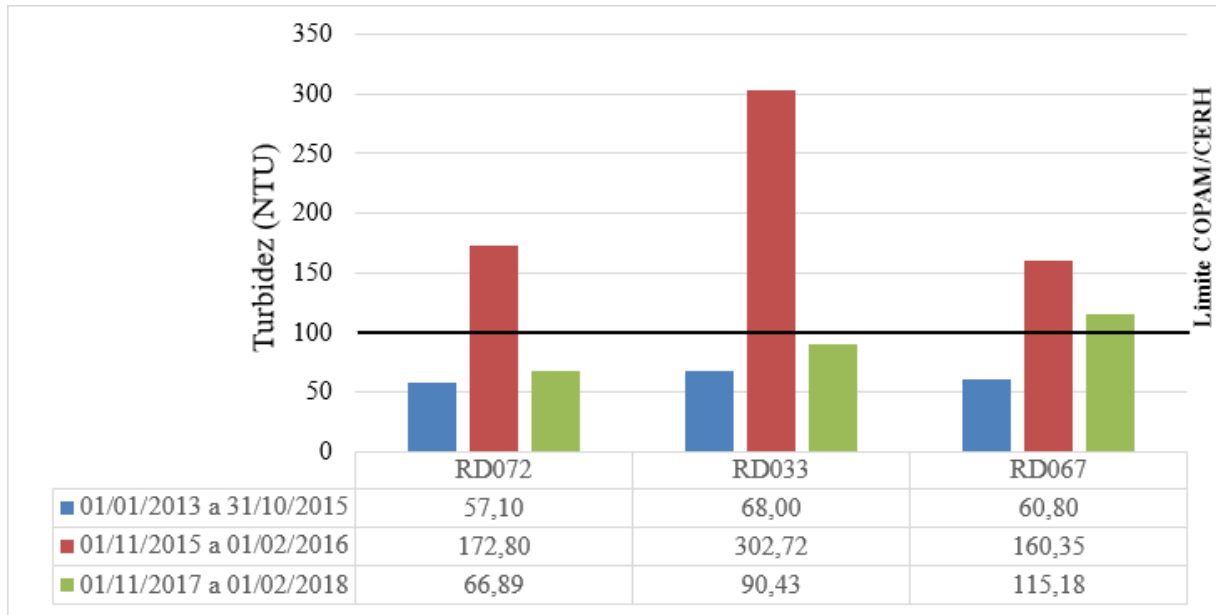
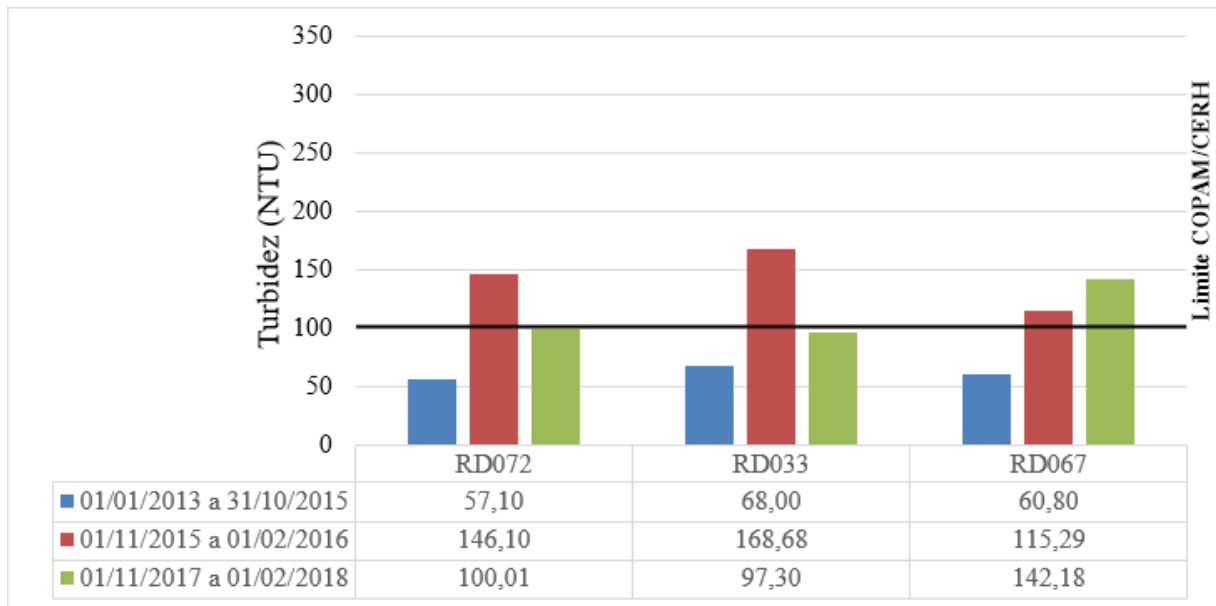


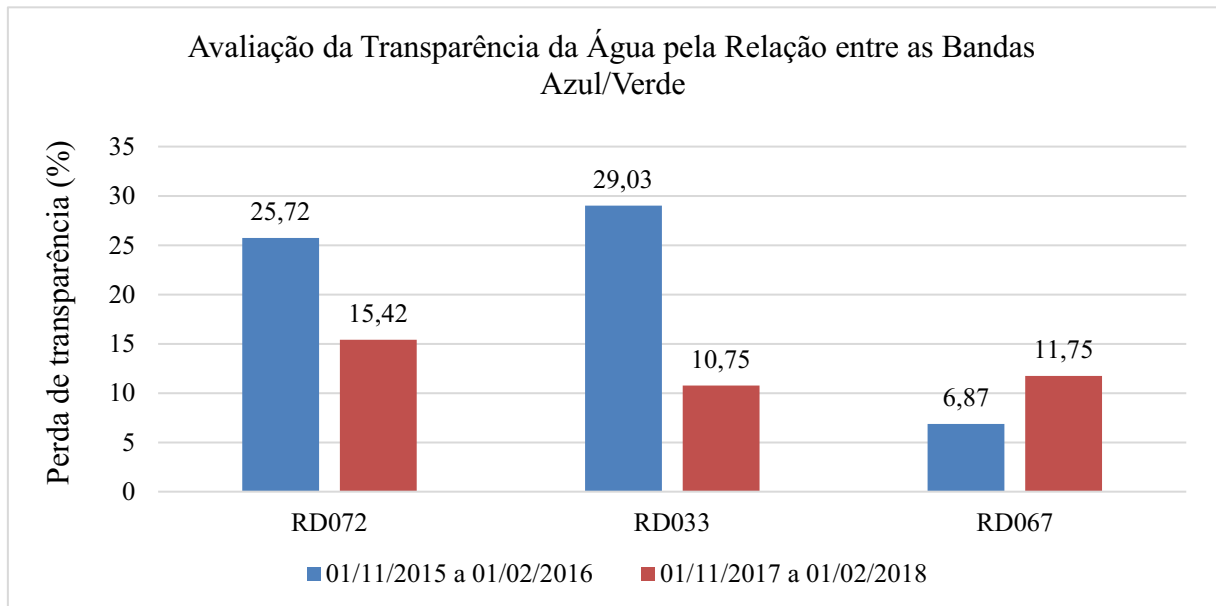
Figura 16 – Valores de turbidez estimados utilizando a banda do vermelho.



Segundo a Deliberação Conjunta COPAM/CERH nº 01/2008 o limite de turbidez para o Rio Doce (classificado como classe 2) é de 100 NTU, valor ultrapassado em todas as estações no período do desastre. A partir da análise dos índices estatísticos, constata-se que a banda do infravermelho próximo é mais sensível a mudanças. Ao examinar os últimos relatórios técnicos do Rio Doce, fornecidos pelo IGAM, verifica-se que o período compreendido entre 01/11/2017 e 01/02/2018 encontra-se com valores de turbidez estabilizados, atingindo, na maior parte do tempo, valores abaixo do limite permitido.

Partindo do princípio que a turbidez é o inverso da transparência, a avaliação quanto a profundidade do disco de Secchi foi relacionada com o inverso do valor histórico da turbidez, seguindo a relação matemática aplicada anteriormente, servindo para determinar alterações na transparência da água. A partir dessas considerações, foi gerada a Figura 17, que indica o decréscimo de transparência sofrido pelo corpo hídrico nos períodos subsequentes ao desastre.

Figura 17 – Transparência da água a partir da relação do Disco de Secchi.



Verifica-se que a perda de transparência é maior nos dois primeiros pontos de observação ao longo do rio, concentrando essa perda de transparência na RD033. A RD067 sofreu a menor influência do desastre nos períodos analisados, isso também se deve a fatores como a distância do rompimento e percurso da água, conforme já discutido na Figura 14.

A análise da trajetória dos pixels referentes as estações de monitoramento foram obtidas para todas as bandas do satélite Landsat 8, porém, para o estudo em questão, apenas as bandas 4 (banda do vermelho) e 5 (banda do infravermelho próximo) são relevantes, uma vez que refletem diretamente o comportamento da turbidez.

Dessa forma, as Figuras 18,19,20,21,22 e 23 indicam as médias anuais (das assinaturas espectrais) e as trajetórias dos pixels. Vale ressaltar que a análise do percurso não é um parâmetro a ser considerado de forma isolada, uma vez que os períodos possuem quantidade de imagens diferentes (86 imagens nas estações RD033 e RD072 e 172 imagens na estação RD067), captadas em períodos distintos, também sofrendo a influência de fatores externos, como eventos de chuvas. Os valores das ordenadas foram omitidos, uma vez que não são relevantes para esse tipo de análise, já que representam valores brutos das bandas.

Figura 18 – Trajetória da banda do vermelho para a estação RD072.

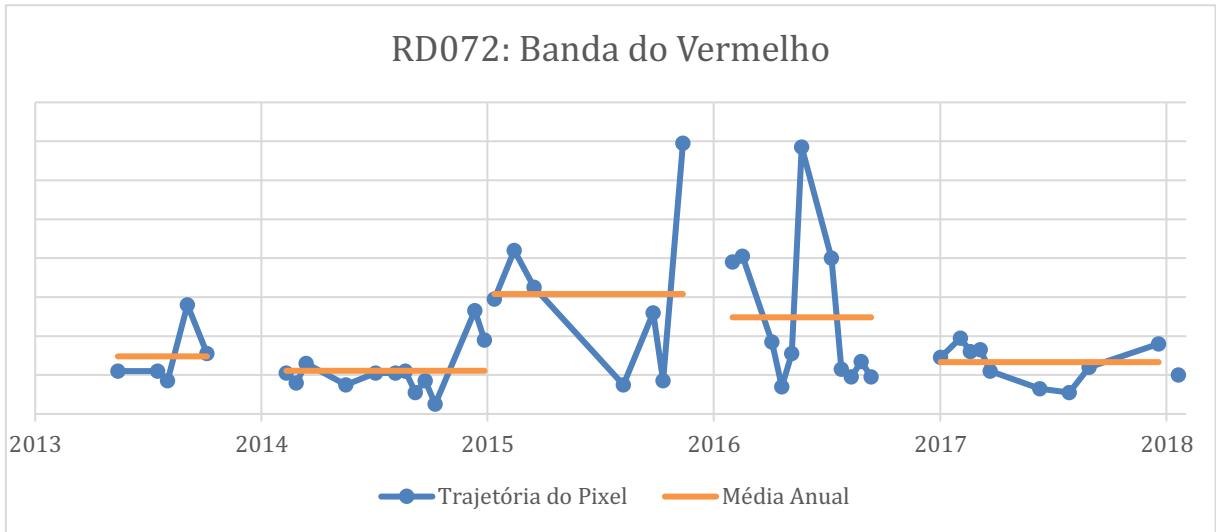


Figura 19 – Trajetória da banda do infravermelho próximo para a estação RD072.

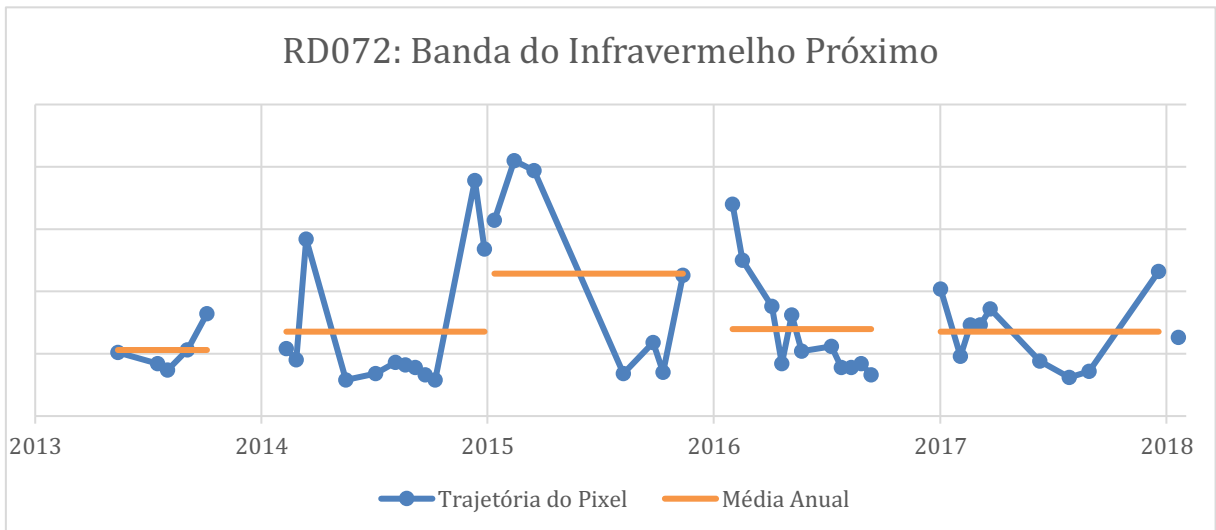


Figura 20 – Trajetória da banda do vermelho para a estação RD033.

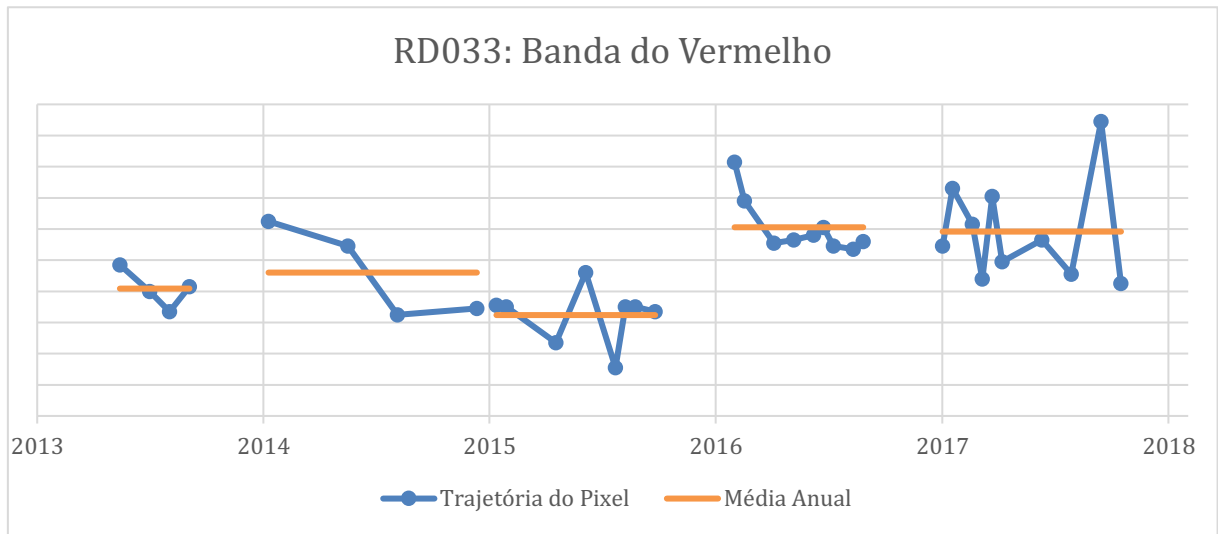


Figura 21 – Trajetória da banda do infravermelho próximo para a estação RD033.

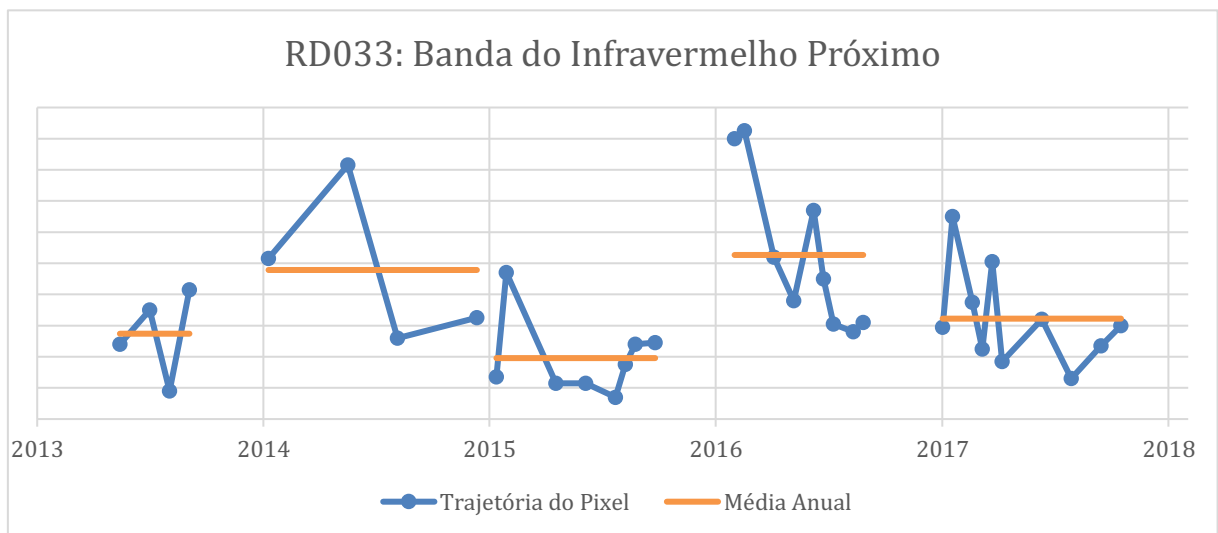


Figura 22 – Trajetória da banda do vermelho para a estação RD067.

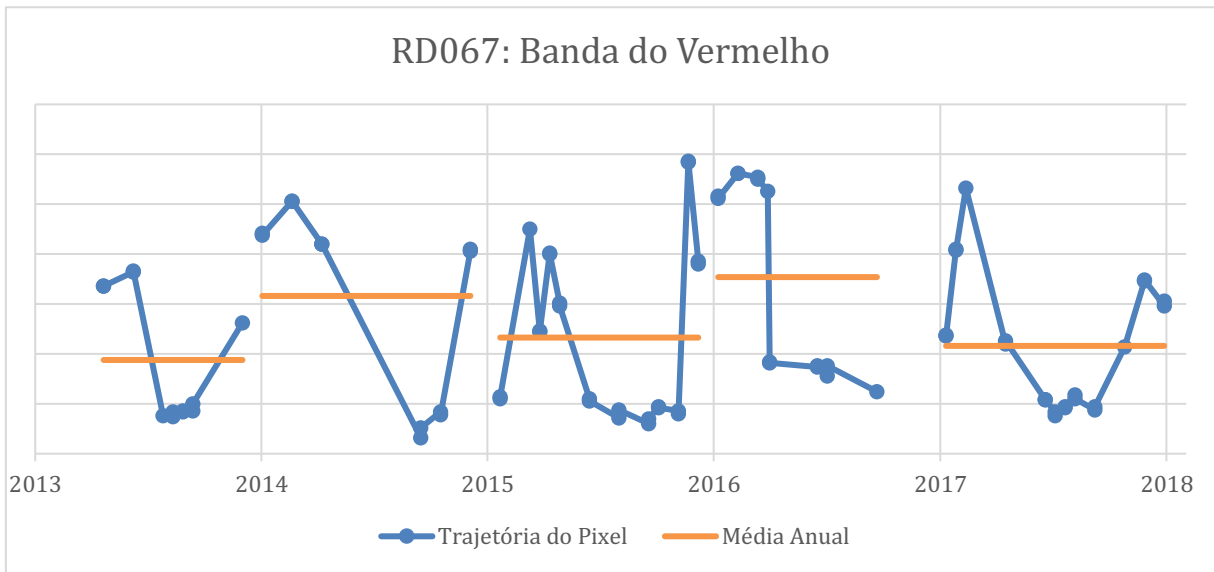
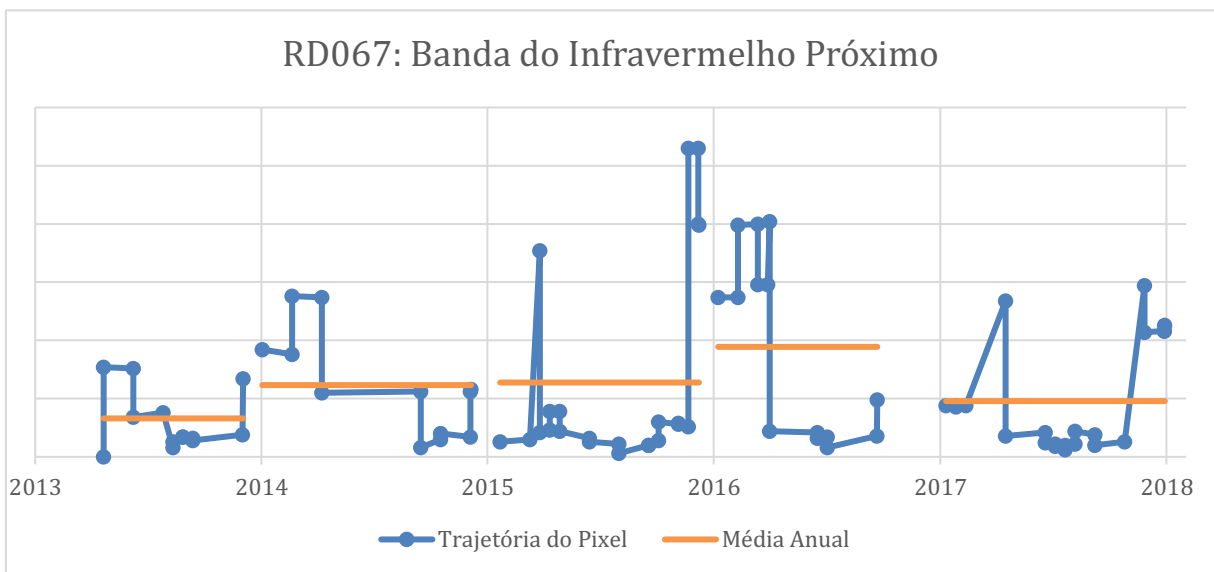


Figura 23 – Trajetória da banda do infravermelho próximo para a estação RD067.



Nota-se que a partir do desastre, ocorrido em novembro de 2015, houve um aumento considerável na trajetória e, conseqüentemente, nos períodos posteriores, onde a média anual da trajetória teve um crescimento considerável. Por ser mais sensível a mudanças, os valores referentes ao infravermelho próximo se tornam mais consistentes para a análise da trajetória, uma vez que é esperado que as médias anuais dos anos 2015 e 2016 sejam mais elevadas em decorrência do desastre.

5. CONCLUSÃO

A avaliação dos parâmetros de qualidade de água analisados através de técnicas de sensoriamento remoto mostrou-se eficiente no monitoramento da qualidade da água do Rio Doce, apresentando resultados condizentes com o período estudado, onde esperava-se que a partir da ocorrência do desastre da Barragem de Fundão, os valores demonstrassem uma drástica perda de qualidade nas águas do rio.

Analisando as combinações de bandas, pode-se dizer que os resultados de turbidez, baseado no estudo estatístico e na trajetória dos pixels, evidenciou que a banda correspondente ao infravermelho próximo se mostra mais eficaz, possuindo maior sensibilidade aos eventos que alteraram a qualidade do corpo hídrico.

Na análise da clorofila *a*, pode-se notar a maior sensibilidade da combinação entre as bandas do verde e azul, embora o resultado não possa ter sido quantificado, a análise da variabilidade demonstrou que houve mudanças drásticas na presença desse parâmetro nos últimos anos.

A resposta acerca da transparência da água utilizando a profundidade do Disco de Secchi também mostrou resultados coerentes e satisfatórios, indicando perdas de até 29% na transparência da água após a passagem das águas oriundas da barragem de rejeitos.

Partindo das respostas obtidas nesse estudo, observa-se que o sensoriamento remoto é uma ferramenta promissora na detecção de parâmetros de qualidade de água, podendo identificar modificações nos padrões existentes em corpos hídricos, seja através de análises periódicas ou a partir de alterações na trajetória esperada. Logo, o sensoriamento remoto pode tornar-se um grande aliado para gestores de água e órgãos ambientais, uma vez que é capaz de avaliar corpos hídricos remotos que não possuem estações de monitoramento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Agência Nacional de Águas**, 2017. Disponível em: <<http://www3.ana.gov.br/portal/ANA/sala-de-situacao/rio-doce/>>. Acesso em: 14 Novembro 2018.
- ANDRADE, A. C. F. D. **Dados MODIS e Landsat-8 para Análise da Água da Lagoa dos Patos, RS**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 65. 2016.
- BOAS, M. D. V. et al. **Avaliação das Estações da Rede de Monitoramento de Qualidade da Água do Rio Piabanha a Partir da Análise de Fatores**. XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Brasília: [s.n.]. 2015. p. 8.
- CÂMARA, F. R. D. A. **Demanda Química de Oxigênio, Clorofila a e Comunidade Fitoplanctônica como Indicadores da Qualidade da Água no Canal do Pataxó/RN**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, p. 124. 2007.
- CETESB. **L5.306: Determinação de Clorofila a e Feofitina a: método espectrofotométrico**. São Paulo, p. 14. 2014.
- CETESB. **Relatório de qualidade das águas interiores do estado de São Paulo**. São Paulo, p. 273. 2003.
- CLARKE, E. D. et al. Calibrating Remotely Sensed Chlorophyll-a Data by Using Penalized Regression Splines. **Splines Journal of the Royal Statistical Society**, [S.l.], n. 55, p. 331-353, 2006.
- CONAMA. Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Brasília, DF, p. 58-63, 2005.
- CUNHA, D. G. F. et al. Resolução CONAMA 357/2005: análise espacial espacial e temporal de não conformidades em rios e reservatórios do estado de São Paulo de acordo com seus enquadramentos (2005-2009). **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 18, n. 2, p. 159-168, Abril 2013.
- ELACHI, C.; ZYL, J. V. **Introduction to the Physics and Techniques of Remote Sensing**. 2ª. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2006.
- EMBRAPA. Landsat, 2008. Disponível em: <<https://www.cnpm.embrapa.br/projetos/cdbrasil/txt/landsat.htm>>. Acesso em: 20 Julho 2018.
- EMPRESA BRASIL DE COMUNICAÇÃO. **EBC Online**, 2008. Disponível em: <<http://www.ebc.com.br/especiais-agua/agua-no-brasil/>>. Acesso em: 11 Julho 2018.

- EIPHANIO, J. C. N.; GLERIAN, J.; FORMAGIO, A. R.; RUDORFF, B. F. T. **Índices de vegetação no sensoriamento remoto da cultura de feijão**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.31, n.6, p.445-454, 1996.
- EIPHANIO, J. C. N. Satélites de Sensoriamento Remoto. In: MORAES , E. C. D. **Fundamentos de Sensoriamento Remoto**. São José dos Campos: INPE, 2002. Cap. 2.
- FITZ, P. R. **Geoprocessamento Sem Complicação**. 1ª. ed. São Paulo: Oficina de textos, 2008.
- FLORENZANO, T. G. **Iniciação em Sensoriamento Remoto**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.
- FLORENZANO, T. G. **Os Satélites e Suas Aplicações**. 1ª. ed. São José dos Campos: SindCT, v. II, 2008.
- G1, Portal. **Desastre Ambiental em Mariana**. 2015. Disponível em: <<http://g1.globo.com/minas-gerais/desastre-ambiental-em-mariana/>>. Acesso em: 12 nov. 2018.
- GAO, Bo-cai. NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. **Remote Sensing Of Environment**, [s.l.], v. 58, n. 3, p.257-266, dez. 1996. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0034-4257\(96\)00067-3](http://dx.doi.org/10.1016/s0034-4257(96)00067-3).
- GHOLIZADEH, M. H.; MELESSE, A. M.; REDDI, L. A Comprehensive Review on Water Quality. **Sensors**, [S.I.], v. 16, n. 8, p. 1298, Agosto 2016.
- GREENPEACE. **Greenpeace Brasil**, 2016. Disponível em: <<https://www.greenpeace.org.br/riodoce/>>. Acesso em: 10 nov. 2018.
- GORELICK, Noel et al. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. **Remote Sensing of Environment**, v. 202, p. 18-27, 2017.
- HURWITZ, Judith; BLOOR, Robin; KAUFMAN, Marcia; HALPER, Fern. **Cloud Computing for Dummies**; 1. ed Indiana, U.S. : Wiley Publishing, Inc; 2010. 336 p. ISBN: 978-0-470-48470-8
- IGAM - INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS. **Encarte Especial Sobre a Qualidade das Águas do Rio Doce Após 2 Anos do Rompimento de Barragem de Fundão - 2015/2017**. Governo Estadual de Minas Gerais. Belo Horizonte, p. 35. 2017.
- JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: Uma Perspectiva em Recursos Terrestres**. 2ª. ed. São José dos Campos: Parêntese, 2009.
- KOBIYAMA, M.; MOTA, A. D. A.; CORSEUIL, W. C. **Recursos Hídricos e Saneamento**. 1ª. ed. Curitiba: Organic Trading, 2008.

- LIU, W. T. H. **Aplicações de Sensoriamento Remoto**. 21^a. ed. Campo Grande: UNIDERP, 2007.
- LOYD, C. Landsat 8 Bands. **Landsat Science**, 14 Jun 2013. Disponível em: <<https://landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-8/landsat-8-bands/>>. Acesso em: 20 Julho 2018.
- LUÍZ, Â. M. E.; PINTO, M. L. C.; SCHEFFER, E. W. D. O. Parâmetros de Cor e Turbidez como Indicadores de Impactos Resultantes do Uso do Solo, na Bacia Hidrográfica do Rio Taquaral, São Mateus do Sul-PR. **Ra'eGa**, Curitiba, n. 24, p. 290-310, 2012.
- MARTINS, V. F. C. et al. **Avaliação da Qualidade da Água Lagoa José Félix, Sete Lagoas - MG: I Parâmetros Físico-Químicos**. XII Congresso Nacional de Meio Ambiente de Poços de Caldas. Poços de Caldas: [s.n.]. 2015. p. 1-7.
- MENDES, C. A. B.; CIRILO, J. A. **Geoprocessamento em Recursos Hídricos: Princípios, Integração e Aplicação**. 1^a. ed. Porto Alegre: ABRH, v. I, 2001.
- MENESES, P.; ALMEIDA, T. **Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto**. Brasília: CNPq, 2012.
- MERTEN, G. H.; MINELLA, J. P. Qualidade da Água em Bacias Hidrográficas Rurais: Um Desafio Atual para a Sobrevivência Futura. **Agroecologia e Desenvolvimento Rural Sustentável**, Porto Alegre, v. 3, n. 4, p. 33-38, Dezembro 2002.
- MILLER, H. M. . R. L. K. S. R. . L. J. & K. L. Users, Uses, and Value of Landsat Satellite Imagery. **U.S. Geological Survey Open-File Report**, [S.I.], 2013. 51.
- MILAN EQUIPAMENTOS (Paraná). **Disco de Secchi**. 2018. Disponível em: <http://www.milan-ec.com.br/produto_interna/id/11/Disco-de-secchi>. Acesso em: 11 nov. 2018.
- MINISTÉRIO DA SAÚDE. **Vigilância e Controle da Qualidade da Água para Consumo Humano**. Secretaria de Vigilância em Saúde. Brasília, p. 212. 2006.
- MOORE, G. K. **Satellite Surveillance of Physical Water Quality Characteristics**. XXII International Symposium on Remote Sensing of Environment. Arbor, Michigan: ERIM. 1978. p. 445-462.
- NOVO, E. M. L. D. M. **Sensoriamento Remoto: Princípios e Aplicações**. 3^a. ed. São Paulo: Blucher, 2008.
- PATEL, Nirav N. et al. Multitemporal settlement and population mapping from Landsat using Google Earth Engine. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 35, p. 199-208, 2015.

- PAVANELLI, G. **Eficiência de Diferentes Tipos de Coagulantes na Coagulação, Floculação e Sedimentação de Água com Cor ou Turbidez Elevada**. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 233. 2001.
- POMPÊO, M. L. M. **O Disco de Secchi**. Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 40-45. 1999.
- ROY, D. P. E. A. Landsat-8: Science and Product Vision for Terrestrial Global Change Research. **Remote Sensing Of Environment**, Abril 2014. 154-172.
- SECRETARIA NACIONAL DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Qualidade da água e padrões de potabilidade: guia do profissional em treinamento**. Belo Horizonte, p. 80. 2007.
- SETTI, A. A. et al. **Introdução ao Gerenciamento de Recursos Hídricos**. 2ª. ed. Brasília: ANEEL, 2001.
- SILVA, C. A. V. et al. Uso do Sensoriamento Remoto através de Índices de Vegetação NDVI, SAVI e IAF na microrregião de Itamaracá - PE. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14., 2009, Natal. **Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. Natal: INPE, 2009. p. 1 - 7.
- SILVA, F. H. R. **Um estudo sobre os benefícios e os riscos de segurança na utilização de Cloud Computing**; 2010. 15f. Artigo científico de conclusão de curso apresentado no Centro Universitário Augusto Motta, UNISUAM-RJ.
- SOUZA, J. R. D. et al. A Importância da Qualidade da Água e os seus Múltiplos. **Revista Eletrônica do Prodema**, Fortaleza, v. 8, n. 1, p. 26-45, Abril 2014. ISSN 1982-5528.
- USGS. Landsat 8. **United States Geological Survey**, 2018. Disponível em: <<https://landsat.usgs.gov/landsat-8>>. Acesso em: 21 Julho 2018.
- VENTURA, D. L. T. **Uso do Sensoriamento Remoto Para Monitoramento da Concentração de Clorofila A em Açudes do Semiárido**. Dissertação (Mestrado) - Universidade de Brasília. Brasília, p. 53. 2013.
- VERÓL, A. P. et al. **Procedimentos Analíticos e Resultados no Monitoramento do Tratamento de Esgotos**. XXIII Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Campo Grande: ABES - Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. 2005. p. 1-6.
- VILELA, M. A. M. A. **Metodologia para Monitoramento da Qualidade de Água de Reservatórios Utilizando Sensoriamento Remoto**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, p. 105. 2010.
- VON SPERLING, Marcos. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. Belo Horizonte. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental UFMG, 2005.

WAACK, R. **Folha de S. Paulo**, 2018. Disponível em: <<https://www1.folha.uol.com.br/opiniaio/2017/11/1932776-uma-alternativa-para-a-bacia-do-rio-doce.shtml>>. Acesso em: 09 Novembro 2018.

WETZEL, R. G. **Limnology**. 2^a. ed. Philadelphia: Saunders College Publishing, 1983.

APÊNDICE A – Código Fonte Utilizado no Google Earth Engine

```

// This example demonstrates the use of the pixel QA band to mask
// clouds in surface reflectance (SR) data. It is suitable
// for use with any of the Landsat SR datasets.
// Function to cloud mask from the pixel_qa band of Landsat 8 SR data.
function maskL8sr(image) {
// Bits 3 and 5 are cloud shadow and cloud, respectively.
  var cloudShadowBitMask = 1 << 3;
  var cloudsBitMask = 1 << 5;
// Get the pixel QA band.
  var qa = image.select('pixel_qa');
// Both flags should be set to zero, indicating clear conditions.
  var mask = qa.bitwiseAnd(cloudShadowBitMask).eq(0)
    .and(qa.bitwiseAnd(cloudsBitMask).eq(0));
// Return the masked image, scaled to TOA reflectance, without the QA bands.
  return image.updateMask(mask).divide(10000)
    .select("B[0-9]*")
    .copyProperties(image, ["system:time_start"]);
}
// Map the function over one year of data.
var collection = ee.ImageCollection('LANDSAT/LC08/C01/T1_SR')
  .filterDate()
  .map(maskL8sr)
var composite = collection.median().clip();
// Parameters
var cla1 = composite.expression(
  '((GREEN) / (RED))', {
    'GREEN': composite.select('B3'),
    'RED': composite.select('B4')
  });
var cla2 = composite.expression(
  '((GREEN) / (BLUE))', {
    'GREEN': composite.select('B3'),

```

```

    'BLUE': composite.select('B2')
  });
var cla3 = composite.expression(
  '((BLUE) / (RED))', {
    'BLUE': composite.select('B2'),
    'RED': composite.select('B4')
  });
var ndwi = composite.expression(
  '((GREEN) - (NIR))/(GREEN) + (NIR) )', {
    'GREEN': composite.select('B3'),
    'NIR': composite.select('B5')
  });
var tur1 = composite.expression(
  '(NIR)', {
    'NIR': composite.select('B5')
  });
var tur2 = composite.expression(
  '(RED)', {
    'RED': composite.select('B4')
  });
var sec1 = composite.expression(
  '((BLUE)/(GREEN))', {
    'GREEN': composite.select('B3'),
    'BLUE': composite.select('B2')
  });
Export.image.toDrive({
  image: cla1,
  description:'cla_1',
  region: table,
  scale: 30,
  fileFormat: 'GeoTIFF',
  maxPixels: 1e10,
});

```



```
Export.image.toDrive({
    image: cla2,
    description:'cla_2',
    region: table,
    scale: 30,
    fileFormat: 'GeoTIFF',
    maxPixels: 1e10,
    folder: 'RD072'
});
Export.image.toDrive({
    image: cla3,
    description:'cla_3',
    region: table,
    scale: 30,
    fileFormat: 'GeoTIFF',
    maxPixels: 1e10,
});
Export.image.toDrive({
    image: ndwi,
    description:'ndwi',
    region: table,
    scale: 30,
    fileFormat: 'GeoTIFF',
    maxPixels: 1e10,
});
Export.image.toDrive({
    image: tur1,
    description:'tur_1',
    region: table,
    scale: 30,
    fileFormat: 'GeoTIFF',
    maxPixels: 1e10,
});
```

```
Export.image.toDrive({  
    image: tur2,  
    description:'tur_2',  
    region: table,  
    scale: 30,  
    fileFormat: 'GeoTIFF',  
    maxPixels: 1e10,  
});  
Export.image.toDrive({  
    image: sec1,  
    description:'sec_1',  
    region: table,  
    scale: 30,  
    fileFormat: 'GeoTIFF',  
    maxPixels: 1e10,  
});
```

APÊNDICE B – Código Fonte Utilizado no R

```
library(sp)
library(rgdal)
library(raster)
setwd('')
ndwi<-raster('')
plot(ndwi>-1)
fichs.imagens <- list.files(pattern = "*", full.names = TRUE)
maps<- stack(fichs.imagens)
maps[ndwi<(-1)]<- NaN
plot(maps)
dataf<- as.data.frame(maps[[1]],na.rm=TRUE)
write.csv(dataf,file = "cla_13r.csv")
writeRaster(maps[[1]], "cla_13r.tif")
dataf<- as.data.frame(maps[[2]],na.rm=TRUE)
write.csv(dataf,file = "cla_23r.csv")
writeRaster(maps[[2]], "cla_23r.tif")
dataf<- as.data.frame(maps[[3]],na.rm=TRUE)
write.csv(dataf,file = "cla_33r.csv")
writeRaster(maps[[3]], "cla_33r.tif")
dataf<- as.data.frame(maps[[4]],na.rm=TRUE)
write.csv(dataf,file = "sec_13r.csv")
writeRaster(maps[[4]], "sec_13r.tif")
dataf<- as.data.frame(maps[[5]],na.rm=TRUE)
write.csv(dataf,file = "tur_13r.csv")
writeRaster(maps[[5]], "tur_13r.tif")
dataf<- as.data.frame(maps[[6]],na.rm=TRUE)
write.csv(dataf,file = "tur_23r.csv")
writeRaster(maps[[6]], "tur_23r.tif")
```