

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Instituto de Geociências
Programa de Pós-Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais

Rafael Mendes de Freitas

**PROPOSTA DE MELHORIA DO PROCESSO DE DEFINIÇÃO DA ÁREA
DIRETAMENTE AFETADA PELO REJEITO NAS REGIÕES ENCOBERTAS PELA
VEGETAÇÃO**
Estudo de caso: Barragem B1 da Mina Córrego do Feijão – Brumadinho - MG

Belo Horizonte
2021

Rafael Mendes de Freitas

**PROPOSTA DE MELHORIA DO PROCESSO DE DEFINIÇÃO DA ÁREA
DIRETAMENTE AFETADA PELO REJEITO NAS REGIÕES ENCOBERTAS PELA
VEGETAÇÃO**

Estudo de caso: Barragem B1 da Mina Córrego do Feijão – Brumadinho - MG

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Alexandrino Garcia

Belo Horizonte
2021

F866p
2021

Freitas, Rafael Mendes de.

Proposta de melhoria do processo de definição da área diretamente afetada pelo rejeito nas regiões encobertas pela vegetação [manuscrito] : estudo de caso: barragem B1 da Mina Córrego do Feijão - Brumadinho - MG / Rafael Mendes de Freitas. – 2021.

60 f., enc.: il. (principalmente color.)

Orientador: Ricardo Alexandrino Garcia.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Cartografia, 2021.

Bibliografia: f. 54-60.

1. Modelagem de dados – Aspectos ambientais – Teses. 2. Barragens e açudes – Minas Gerais – Teses. 3. Resíduos – Teses. 4. Acidentes de mina – Teses. 5. Radar ótico – Teses. I. Garcia, Ricardo Alexandrino. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Departamento de Cartografia. III. Título.

CDU: 911.2:519.6(815.1)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ANÁLISE E MODELAGEM DE SISTEMAS AMBIENTAIS

FOLHA DE APROVAÇÃO

Proposta de melhoria do processo de definição da área diretamente afetada pelo rejeito nas regiões encobertas pela vegetação

RAFAEL MENDES DE FREITAS

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ANÁLISE E MODELAGEM DE SISTEMAS AMBIENTAIS, como requisito para obtenção do grau de Mestre em ANÁLISE E MODELAGEM DE SISTEMAS AMBIENTAIS, área de concentração ANÁLISE, MODELAGEM E GESTÃO DE SISTEMAS AMBIENTAIS.

Dr. Ricardo Alexandrino Garcia - Orientador
UFMG

Dr. Luciano Mozer de Assis
Vale S/A

Dr. Marcelo Antonio Nero
UFMG

Belo Horizonte, 23 de fevereiro de 2021.



Documento assinado eletronicamente por **Luciano Mozer de Assis, Usuário Externo**, em 23/02/2021, às 11:07, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marcelo Antonio Nero, Professor do Magistério Superior**, em 23/02/2021, às 11:14, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ricardo Alexandrino Garcia, Professor do Magistério Superior**, em 23/02/2021, às 11:14, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0576732** e o código CRC **80842D4B**.

Agradecimentos

Aos meus pais Helena e Plínio. Muito obrigado por tudo.

Ao meu irmão Luiz (Vou te chamar de padawan agora).

A minha esposa Bruna : P

Em especial a minha filha Joana, de apenas 11 meses, que magicamente sabe todas as horas em que minha escrita não está rendendo e pede meu colo. Com você no meu colo, é mais fácil pensar nos próximos passos.

A UFMG pelos ensinamentos diários que obtive nesta prestigiada instituição. Ao Instituto de Geociências e seus coordenadores. A Cora, com uma dedicação aos alunos impecável. E, claro, ao meu professor, orientador e amigo Ricardo Alexandrino. Muito obrigado pelos ensinamentos e puxões de orelha.

A Vale pela disponibilização dos dados, seriedade e profissionalismo no tratamento de um assunto delicado para a empresa. Em especial a Rodrigo Dutra, Isabel Roquete e João Carlos.

Este estudo é uma singela homenagem a 272 pessoas, em especial ao meu grande amigo Thiago.

Resumo

No dia 25 de janeiro de 2019, ocorreu a ruptura da Barragem B1 na mina de Córrego do Feijão, localizada em Brumadinho/MG. A definição da Área Diretamente Afetada (ADA) pelo evento é a base que subsidia diversos documentos ambientais, sendo que sua correta delimitação afeta diretamente o tratamento das ações de reparação. A densa vegetação florestal “escondeu” zonas que deveriam entrar na ADA, o que acarretou inúmeras dificuldades de mapeamento correto do ocorrido. Esta dissertação visa propor uma nova abordagem metodológica através do mapeamento laser e comparação matricial que contorne as dificuldades impostadas pela vegetação para delimitação do perímetro de ADA, acrescentando novos produtos aos dados finais, como o mapeamento volumétrico do rejeito, que deu suporte às operações de resgate das equipes do corpo de bombeiros que atuaram no local.

Palavras-Chave: Área Diretamente Afetada; LiDAR; Nuvem de pontos; Modelamento Digital de Terreno.

Abstract

On January 25, 2019, B1 Dam in Feijão Mine, located in Brumadinho, MG, collapsed. The mapping of the Directly Affected Area (DAA) by the rupture is used by several Environmental documentations, hence the importance of its correct delimitation for strategies of reparation. The density of the local vegetation made it hard to the precise mapping of the Directly Affected Area. This dissertation aims to propose a new methodological form for delimiting the DAA, presenting the process of revising the affected area perimeter, describing the technologies used in the process, and comparing the perimeter elaborated by traditional methods with the newer ones found by this study. As a complement, this article presents an implemented proposition to the methods, describes how it was useful to support operations of rescue teams in the affected area, and presents the possibility to use it on mass displacement events in general.

Key Words: Directly Affected Area; LiDAR; Point Cloud; Digital Terrain Modeling.

Lista de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1: All, AID, ADA | 10 |
| Figura 2: ADA Inicial..... | 13 |
| Figura 3: Vista no Interior da mata | 14 |
| Figura 4: Divisão Vertical Arbóreo..... | 15 |
| Figura 5: Áreas Protegidas Brumadinho | 16 |
| Figura 6: Fluxograma da Missão <i>Shuttle Laser Altimeter</i> | 20 |
| Figura 7: Equipamentos de LiDAR dentro de uma aeronave | 21 |
| Figura 8: Aerolevante Laser | 22 |
| Figura 9: Características dos sistemas LiDAR | 23 |
| Figura 10: Interação do LiDAR com Corpos D'água | 24 |
| Figura 11: MDS | 25 |
| Figura 12: MDT | 26 |
| Figura 13: Comparação entre MDT e MDS | 27 |
| Figura 14: MDT | 28 |
| Figura 15: Modelo de pontos de fluidez em oito direções (<i>Eight Direction Pour Point Model</i>) | 29 |
| Figura 16: Fluxo dos dados 2D | 30 |
| Figura 17: Captação dos Dados e suas Respectivas Datas | 31 |
| Figura 18: Área de Cálculo do Estudo..... | 32 |
| Figura 19: Cálculo de Matrizes..... | 33 |
| Figura 20: Mapa do Teste 3 | 36 |
| Figura 21: Borda do limite com quadrantes menores que 9m ² | 37 |
| Figura 22: Cálculo do Volume | 37 |
| Figura 23: Cálculo do Volume 1 | 38 |
| Figura 24: Pluviograma de Brumadinho 2019 | 40 |
| Figura 25: ADA Revisada | 41 |
| Figura 26: Primeira ADA e a ADA Revisada | 42 |
| Figura 27: Áreas adicionadas à nova ADA..... | 43 |
| Figura 28: Áreas adicionadas à nova ADA - Zoom | 44 |
| Figura 29: Espessura da lâmina de rejeito | 45 |
| Figura 30: Espessura lâmina de rejeito (Zoom barramento) | 46 |
| Figura 31: Espessura da lâmina de rejeito | 47 |
| Figura 32: Cálculo Volumétrico 1 | 48 |

Lista de Abreviaturas

| | |
|------------|---|
| ADA..... | Área Diretamente afetada |
| AID..... | Área de Influência Indireta |
| AII..... | Área de Impacto Indireto |
| ALS..... | <i>Airborne Laser Scanner</i> Laser Aerotransportado |
| ANM..... | Agência Nacional de Mineração |
| APA..... | Área de Proteção Ambiental |
| APP..... | Área de Proteção Permanente |
| ASCII..... | <i>American Standard Code for Information Interchange</i> Código Padrão Americano para o Intercâmbio de Informação |
| CAR..... | <i>Cadastro Ambiental Rural</i> |
| CONAMA.... | Conselho Nacional do Meio Ambiente |
| CONCAR.... | Comissão Nacional de Cartografia |
| DAP..... | Diâmetro a Altura do Peito |
| EIA..... | Estudo de Impacto Ambiental |
| GPS..... | Global Positioning System Sistema de Posicionamento Global |
| GNSS..... | <i>Global Navigation Satellite System</i> Sistema Global de Navegação por Satélite |
| IBAMA..... | Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis |
| INPE..... | Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais |
| INS..... | Inertial Navigation System |
| IPHAN..... | Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional |
| LiDAR..... | <i>Light Detection And Ranging</i> Detecção de luz ao alcance |
| MDS..... | Modelo Digital de Superfície |
| MDT..... | Modelo Digital de Terreno |
| NASA..... | <i>National Aeronautics and Space Administration</i> Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço |
| NDVI..... | <i>Normalized Difference Vegetation Index</i> Índice de Vegetação com Diferença Normalizada |
| PEC..... | Padrão de Exatidão Cartográfica |
| PPM..... | Ponto Por Metro ² |
| RADAR..... | Radio Detection And Ranging |
| RL..... | Reserva Legal |
| RPA..... | <i>Robotic Process Automation</i> Processos de Automação Robóticas |
| RPPM..... | Reserva Particular do Patrimônio Natural |

Sumário

| | |
|--|----|
| Resumo..... | 5 |
| Abstract..... | 6 |
| Lista de Figuras..... | 7 |
| Lista de Abreviaturas..... | 8 |
| 1 Introdução | 10 |
| 2 Objetivos..... | 18 |
| 2.1 Objetivo Geral | 18 |
| 2.2 Objetivos específicos | 19 |
| 3 Fundamentação Teórica..... | 19 |
| 4 Metodologia | 29 |
| 4.1 Metodologia dos dados 2D | 30 |
| 4.2 Metodologia de Validação dos Dados 2D | 33 |
| 4.3 Metodologia para os cálculos volumétricos | 37 |
| 5 Resultados Obtidos | 39 |
| 5.1 Resultados obtidos – Falsos negativos | 39 |
| 5.3 Resultados obtidos – Comparação entre os limites das ADAs..... | 41 |
| 5.4 Resultados Obtidos - Modelos Altimétricos e Volumétricos | 44 |
| 6 Considerações Finais | 49 |
| 7 Referências Bibliográficas | 54 |

1 Introdução

O Sistema Córrego do Feijão faz parte do Complexo Minerador de Paraopeba, sob concessão da Vale S/A. Localizado em Brumadinho, região metropolitana de Belo Horizonte/MG, o complexo era constituído por diversas estruturas geotécnicas, dentre elas a barragem B1, que tinha como finalidade conter os rejeitos de minério de ferro provenientes do processamento industrial. Em 25 de janeiro de 2019, ocorreu a ruptura com conseqüente desmonte da barragem, com o espalhamento de cerca de 11.1 milhões de toneladas de rejeito de minério nas imediações do município de Brumadinho. (GALVÃO, WETERMEN, 2019).

O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), órgão competente para o estabelecimento de normas e critérios para o licenciamento ambiental e para o estabelecimento de padrões de controle de poluição ambiental, exige uma série de estudos e análises conforme prevê a legislação (CONAMA, 2002), sendo uma das obrigações legais a definição das áreas de influência.

As áreas de influência são delimitadas em três níveis: Área Diretamente Afetada (ADA), Área de Influência Direta (AID) e Área de Influência Indireta (AII), representadas pela Figura 1. Para cada uma das zonas afetadas, a legislação define particularidades de atuação, e por isto, é de extrema importância a delimitação adequada de cada uma delas (ARCADIS, 2010).

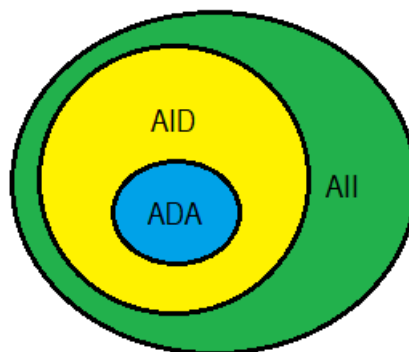


Figura 1: AII, AID, ADA

Fonte: Rafael Freitas, 2020

A Área Diretamente Afetada, de acordo com a Legislação Geral do Licenciamento Ambiental CONAMA 305, em seu texto base, capítulo I, artigo 2, pode ser definida como: “intervenção direta da atividade ou empreendimento, necessária para a sua construção, instalação, ampliação e operação.” (CONAMA, 2002).

O capítulo VII da Resolução CONAMA 305 adiciona mais instruções normativas e o conceito de: “Degradação da qualidade ambiental – Poluição ou alteração adversa das características do meio ambiente.” (CONAMA, 2002).

De acordo com o artigo 2º da Resolução CONAMA 349 (CONAMA, 2004), considera-se a Área Diretamente Afetada – ADA – a área necessária para a implantação do empreendimento, incluindo suas estruturas de apoio, vias de acesso privativas que precisarão ser construídas, ampliadas ou reformadas, bem como todas as demais operações unitárias associadas exclusivamente à infraestrutura do projeto, ou seja, de uso privativo do empreendimento.

As diversas definições legais de ADA podem trazer particularidades específicas nos termos de ajuste de conduta e delimitação da área, e conforme as etapas de licenciamento do empreendimento são conduzidas, serão definidas como as condicionantes serão cumpridas.

Outros órgãos podem apresentar proposições novas a ADA, como fez o IPHAN na Instrução normativa 1 de 25 de março de 2015, onde são definidas ações adicionais caso existam patrimônios culturais, materiais ou imateriais dentro da ADA (MINISTÉRIO DA CULTURA, 2015).

Os diversos textos mostram a complexidade do tema, afinal, comparando as três diretrizes, pode-se argumentar que a poluição atmosférica seria uma ADA pela resolução CONAMA, mas na Legislação Geral do Licenciamento Ambiental seria uma AII.

Para se resolver este e diversos outros problemas da legislação, a necessidade de reforma dos artigos ambientais ganhou força, mas o projeto de unificação da legislação ambiental foi paralisado através do decreto 9.672, de 2 de janeiro de 2019 (BRASIL, 2019), que estabeleceu um novo desenho institucional para o Ministério do Meio Ambiente via Medida Provisória (MPV) 870/2019, que reestrutura a administração federal (GONÇALVES JR., 2019).

Assim, a reforma na legislação ambiental foi paralisada (ato que teria força de lei maior), e as instrumentações legais passaram a ser concentradas no poder executivo, que exerce seu poder através do Ministério do Meio Ambiente.

Diante do exposto sobre a legislação, a boa delimitação e conceitualização das áreas de influência é fundamental para respaldo jurídico de todos os envolvidos, já que o estabelecimento destes perímetros influencia diretamente nas diretrizes e atribuições dos diversos órgãos fiscalizadores e responsabilidades da empresa em questão.

Para gerar a primeira versão da ADA, foi utilizado o método de vetorização sobre imagem aerolevantada, que seguiu as diretrizes abaixo:

No dia seguinte à ruptura, 26 de janeiro de 2019, foi realizado o perfilamento laser da região usando o equipamento LiDAR (*Light Detection And Ranging*) com o objetivo de se conseguir o modelo digital de elevação do pós-rompimento da barragem B1 e ser possível mapear os impactos ocasionados pelo evento.

No dia 29, outro voo foi realizado com o escopo de gerar imagens óticas aéreas atualizadas do local. Os detalhes do imageamento ótico e do LiDAR obtidos são descritos no capítulo "*Fundamentação Teórica*".

Os dados do LiDAR e as imagens óticas foram tratadas de modo a atingir o Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) classe A, 1:5.000, de acordo com os padrões normativos do decreto nº 89.817 de 20 de junho de 1984 (BRASIL, 1984), definidos pela Comissão Nacional de Cartografia, a CONCAR.

Dados preliminares foram utilizados até o dia 06/02/2019, quando foram consolidados, padronizados, organizados e alocados dentro do banco de dados. Em sequência, iniciou-se a produção cartográfica, incluindo a geração da ADA.

A ADA gerada seguiu os parâmetros legais de demarcação da legislação, sendo vetorizada através da imagem aerolevantada do dia 29 e concebeu uma poligonal que ocupava uma área de 296,2 hectares, conforme demonstra a Figura 2.

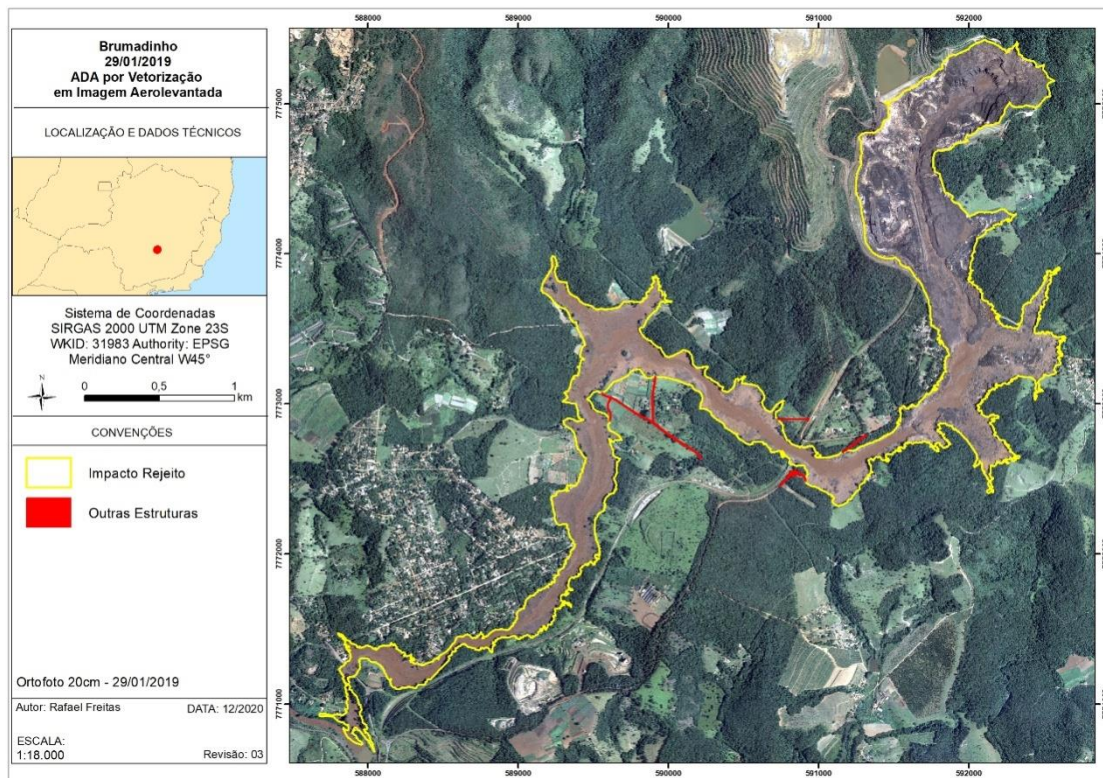


Figura 2: ADA Inicial

Fonte: Rafael Freitas, 2020

O perímetro da ruptura gerado utilizando os métodos de vetorização sobre imagem (Figura 2) teve sua importância no momento, ajudando a dimensionar as áreas afetadas pelo acidente e fornecendo mapas atualizados aos órgãos fiscalizadores, bombeiros, e à própria empresa. Também forneceu dados para facilitar os acessos à região e para a definição de áreas para instalações como pátio de operações, canteiro de obras, entre outras estruturas; contudo, ele tinha espaço para aprimoramentos.

Legalmente, são considerados para a poligonal da ADA impactos como: a construção de canteiro de obras, áreas de apoio às buscas, abertura de estradas, entre outras estruturas que não são o foco deste estudo. Durante este trabalho, vamos descartar as áreas em vermelho na Figura 2, deixando o perímetro com 290 hectares.

Após a finalização da primeira poligonal da ADA, algumas oportunidades de melhorias foram observadas em campo, principalmente nas regiões de vegetação mais densas.

A caracterização arbórea da região foi apresentada no Estudo de Impacto Ambiental (EIA), o documento técnico multidisciplinar que tem o objetivo de realizar avaliação ampla dos impactos ambientais de um projeto.

O documento “*Continuidade das Operações da Mina Jangada*”, de agosto de 2014, realizado conforme Normativa IBAMA nº 11, de 05.12.2003 (MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES, 2003), protocolado e aceito pelo órgão competente e de acesso público, descreve a vegetação local como:

*Apresenta-se com indivíduos predominantemente arbóreos, com **12 e 15 metros de altura**, DAP (Diâmetro à Altura do Peito) acima de 15 cm, epífitas em número considerável, serrapilheira presente e trepadeiras lenhosas características estas do estágio médio de regeneração conforme Resolução CONAMA 28. Além disto, observa-se a presença de muitas espécies da família das Lauraceas¹. Família esta de importância por apresentar madeiras nobres (Figura 3). (Vale S.A. 2014)*



Figura 3: Vista no Interior da mata

Fonte: Renato Gonçalves, 2012

O DAP faz parte da dendrometria, que é definido por GROSENBAUGH (1980) como o estudo e determinação do volume das árvores e suas respectivas partes, bem como a existência de madeira numa dada área. Pelos valores apresentados, a resolução CONAMA 392 (CONAMA, 2007) indica a área como uma Floresta Estacional Semidecidual em estágio médio a avançado de regeneração. As *Lauráceas* têm como seu representante mais famoso o abacateiro, e são árvores robustas que podem ultrapassar o dossel médio local, chegando ao status de emergentes, como está demonstrado na Figura 4.

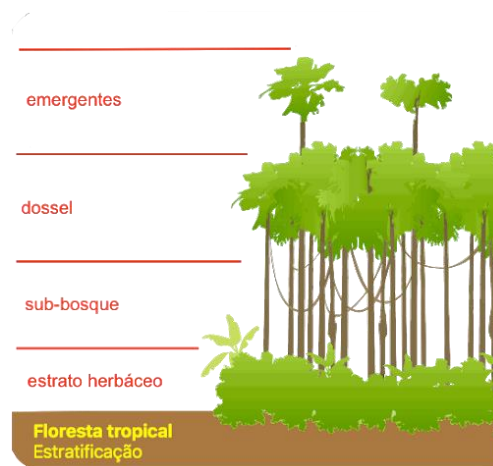


Figura 4: Divisão Vertical Arbóreo

Fonte: Roberto M.F. Mourão, 2015

A figura 5 demonstra espacialmente diversas áreas de proteção ambiental presentes na região, como:

- O Cadastro Ambiental Rural (CAR), que mapeia diversas áreas como Áreas de Proteção Permanente (APP) conforme a Lei nº 4.771, de 15 de setembro de 1965 (BRASIL, 1965) (azul).
- A lei 12.651 de 2012 (BRASIL, 2012), que legisla sobre reservas legais (RL), e que garante que no mínimo 20% da área do empreendimento deve ser destinada à preservação ambiental (verde para áreas Vale e vermelho para outras empresas).

- Ao norte da imagem, destaca-se em rosa a Área de Proteção Ambiental Sul (APA Sul) Dec. 35624 de 08/06/94 (MINAS GERAIS, 1994) complementado pelo Dec. 37812 de 08/03/96 (MINAS GERAIS, 1996).
- Em roxo, diversas propriedades inseridas em diferentes artigos de compensação florestal: artigos 17 e 32 da Lei Federal nº 11.428/06 (BRASIL, 2006), Decreto Federal nº 6.660/08 (BRASIL, 2008) e artigo 75 da Lei 20.922/2013 (MINAS GERAIS, 2013).
- A Reserva Particular do Patrimônio Natural (RPPN) Mata do Jequitibá, Portaria IEF 107 de 27/12/2018 (MINAS GERAIS, 2018).

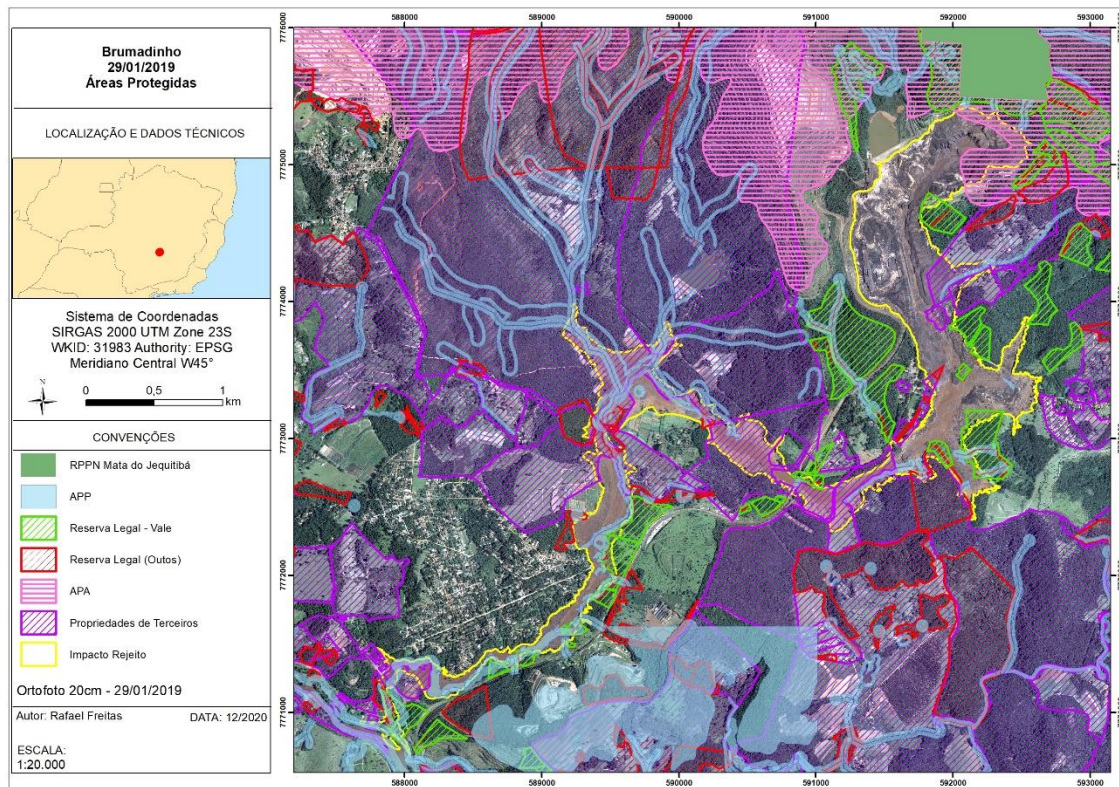


Figura 5: Áreas Protegidas Brumadinho

Fonte: Rafael Freitas, 2020

Como descrito pelo EIA, e apresentado na Figura 5, o dossel arbóreo considerável na região dificulta a visualização do solo e espaços abaixo do dossel, o que impossibilita o uso adequado de imagens aerolevantadas, influenciando

particularmente a criação da ADA da região da ruptura da barragem de Córrego Feijão.

Conforme definido por MORAES (1999), sendo esta uma dificuldade intrínseca ao método ao mapeamento usando ortoimagens, não há solução direta e o problema deve ser contornado com uso de outras técnicas.

Foram realizadas tentativas de mapeamento da ADA em campo, mas alguns fatores impossibilitaram que o trabalho fosse realizado:

- A segurança da equipe que realizaria o trabalho, pois a região a ser mapeada possuía uma mata fechada conforme descrito no EIA.
- Incertezas sobre a estabilidade geotécnica do remanescente de rejeito no reservatório, bem como do rejeito que foi espalhado.
- Chovia muito durante este período (climograma na Figura 22).
- Todos os recursos como carros, telefones satelitais, GPSs (*Global Positioning System*; Sistema de Posicionamento Global), estradas e acessos, etc., foram priorizados para as operações de busca e resgate.
- Houve solicitações da Defesa Civil para que se evitasse ir ao local e houve fechamento de acessos para evitar a entrada de civis na região.

Como já descrito, a ADA é a base para diversos documentos, sendo vital o repasse do perímetro para que diversos órgãos governamentais possam começar seus trabalhos. Com as dificuldades que a área apresenta para se realizar uma boa delimitação com os métodos convencionais, foi proposto o uso de outras técnicas para aprimorar a delimitação existente.

O uso do LiDAR foi proposto como forma de resolver os problemas encontrados e gerar uma nova ADA através da comparação volumétrica de antes e de depois do ocorrido.

A técnica proposta de mapeamento laser para medir volumes já havia sido usada, como demonstrado por SILVA et al.(2016), para a obtenção, através do LiDAR, das diferenças entre pilhas de produto de minério, e, assim, estimando-se volumes. Outros trabalhos também apresentam cálculos semelhantes, mas em escala menor, ambientes controlados e outros fatores que influenciam o estudo.

A técnica apresentada também mostra resultados eficientes para aplicação em situações como terremotos, sismos, desmoronamentos, entre outros eventos de grandes deslocamentos de massas de terra. Estes eventos são constantes no Brasil e no mundo, como, por exemplo, os deslizamentos na região serrana do Rio de Janeiro em 2011, em que 911 pessoas perderam suas vidas e ainda hoje 345 corpos permanecem desaparecidos (SCARINI; RODRIGUES, 2016).

Um estudo de cálculo volumétrico em ambientes complexos, escala e tempos adequados, pode fornecer material útil ao resgate e operações quando se fizer necessário.

Estudos volumétricos também auxiliam no entendimento de como as áreas foram afetadas com a modelagem do terreno original, que ainda pode ajudar na reconformação e recuperação da área.

Com domínio e automatização das técnicas utilizadas, todos os mapas e dados que auxiliariam equipes de resgate podem ser entregues já nos primeiros momentos após o evento (lembrando que o uso do LiDAR não requisita o uso da luz solar, já que é um sensor ativo), ajudando em operações que exigem conhecimentos comparativos de solo.

2 Objetivos

Visando o aperfeiçoamento da poligonal da ADA gerada através de vetorização sobre imagem de satélite, os seguintes objetivos foram traçados para o trabalho:

2.1 Objetivo Geral

Mensurar a área diretamente afetada (ADA) pelo rejeito através de mapeamento LiDAR, visando tanto a otimização dos processos de salvamento e resgate quanto a avaliação dos impactos ambientais das rupturas de barragens.

2.2 Objetivos específicos

- Observar as diferenças entre a ADA proposta pelo método de vetorização em imagem e aquela proposta por este estudo;
- avaliar se a metodologia aplicada neste estudo oferece ganhos caso aplicada em outros eventos semelhantes;
- mapear a profundidade do rejeito de minério de ferro;
- modelar a superfície do terreno para auxílio nos projetos de recuperação ambiental;
- mapear o volume do rejeito mobilizado no acidente;
- avaliar as limitações da metodologia proposta;
- comparar os métodos de delimitação de ADA utilizados;
- comparar os valores obtidos por esta técnica com os valores oficiais.

3 Fundamentação Teórica

Conforme descrito por GIONGO et al., (2010), o LiDAR, abreviatura de *Light Detection And Ranging*, foi criado com base nos fundamentos estabelecidos por Einstein em 1917. Em 1958, Schawlow & Townes pela primeira vez estabeleceram a teoria para obter a amplificação de luz por emissão estimulada de radiação (laser). O LiDAR utiliza os mesmos princípios do sistema de RADAR, com a diferença de que, ao invés do uso de ondas de rádio para localizar os objetos de interesse, o sistema LiDAR utiliza pulsos laser (GIONGO et al., 2010).

Por ser uma tecnologia que exige muito computacionalmente, são poucos os exemplos de uso em larga escala durante os estágios iniciais da tecnologia, até que entre 1996 e 1997, a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) lança a missão *Shuttle Laser Altimeter*, que mediu extensas áreas da superfície terrestre. Esta missão é um marco por ser o primeiro uso em escala global do LiDAR e disponibilizar diversas novas técnicas de processamento (NASA, 1999).

Conforme demonstrado na Figura 6, presente no *Conference Paper* (“relatório da missão”, em tradução livre), o procedimento da NASA para captar os dados conta

com 3 caixas e o processamento exige 6 etapas. A escolha do perfilamento laser para levantamento topográfico e oceanográfico pela NASA é justificada pelo fato de a técnica permitir o levantamento de grandes áreas com acurácia e rapidez (NASA, 1999).

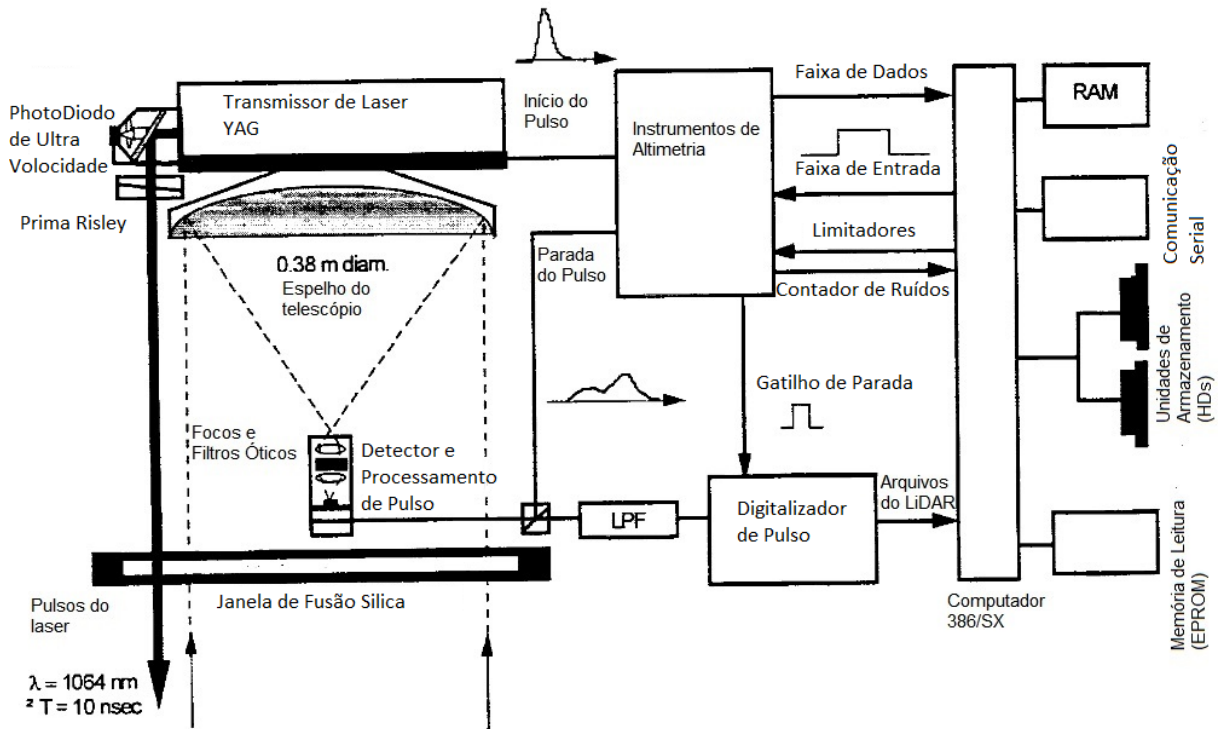


Figura 6: Fluxograma da Missão *Shuttle Laser Altimeter*

Fonte: NASA, 1999. Tradução – Rafael Freitas

Conforme ANDERSEN et al. (apud GIONGO et al., 2010) define, o sistema LiDAR apresenta sua própria fonte de energia, o laser, que emite radiação eletromagnética em ondas curtas (1-10 μm), sendo sensível às perturbações atmosféricas e, assim, é considerado um método direto na captura de dados e classificado como um sensor ativo.

Um sensor ativo é aquele que possui sua própria fonte de radiação eletromagnética ou a radiação eletromagnética recebida pelo sensor foi previamente emitida por ele mesmo (ALMEIDA; FERREIRA, 2012) e uma grande vantagem deste tipo de sensor é não precisar da luz solar para captação dos dados.

O equipamento apresentado na Figura 7 consiste em um sensor remoto ativo que utiliza varredura óptico-mecânica e um feixe de laser como ferramenta de detecção, registrando os seus múltiplos retornos (WEHR; LOHR, 1999).



Figura 7: Equipamentos de LiDAR dentro de uma aeronave

Fonte: LHColus, 2010

Além do LiDAR, são embarcados na aeronave três (3) sistemas adicionais, que podem estar contidos em um mesmo aparelho (GIONGO et al., 2010):

- ALS (Airborne Laser Scanner), que são compostos por um sensor laser que essencialmente registra o tempo entre o sinal emitido e recebido de um determinado ponto.
- Sistema Inercial de Navegação (INS – Inertial Navigation System), também conhecido como “plataforma inercial”, capaz de localizar o norte geográfico pela rotação da Terra a partir de giroscópios e acelerômetros, o que permite a obtenção de um plano de referência estabilizado, já que determina os movimentos nos 3 eixos de uma plataforma, no caso, o avião (SANTANA, 2004).
- Um receptor GNSS (*Global Navigation Satellite System*, ou, Sistema Global de Navegação por Satélite) em uma plataforma aerotransportada.

Como demonstrado na Figura 8, o pulso emitido pelo sensor vai ao objeto pesquisado (a superfície terrestre), que o reflete de volta ao sensor. Medindo o tempo decorrido entre o envio do pulso laser e a obtenção do sinal refletido, tem-se a distância entre os dois. A aeronave tem sua localização traqueada por GNSS de alta

precisão e, assim, sua altitude, latitude e longitude são atualizadas em tempo real. Com estas informações, o terreno é medido com precisão milimétrica, conforme já levantado por WEHR e LOHR (1999).

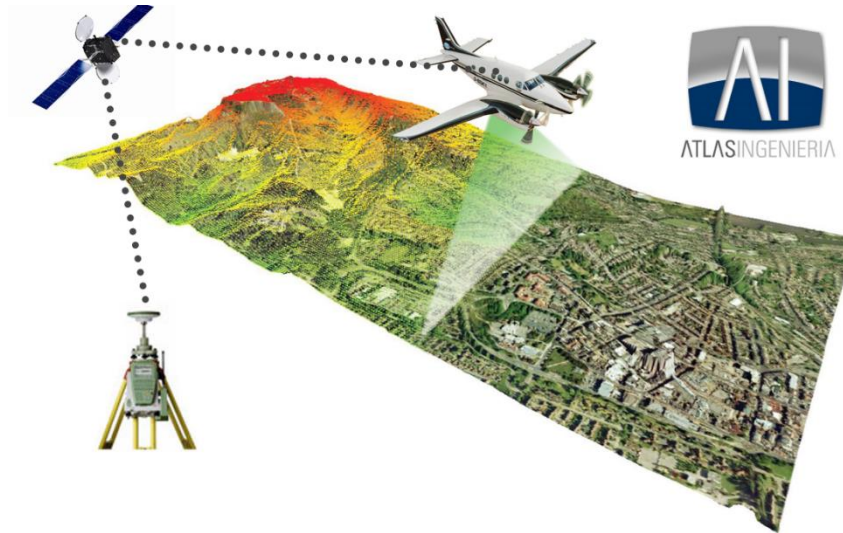


Figura 8: Aerolevanteamento Laser

Fonte: AtlasIngenieria, 2017

Uma característica importante é que os pulsos de laser podem penetrar por pequenas aberturas no dossel da floresta e fornecer informações sobre a estrutura florestal e também sobre o relevo destas áreas (VIANINI NETO, 2016).

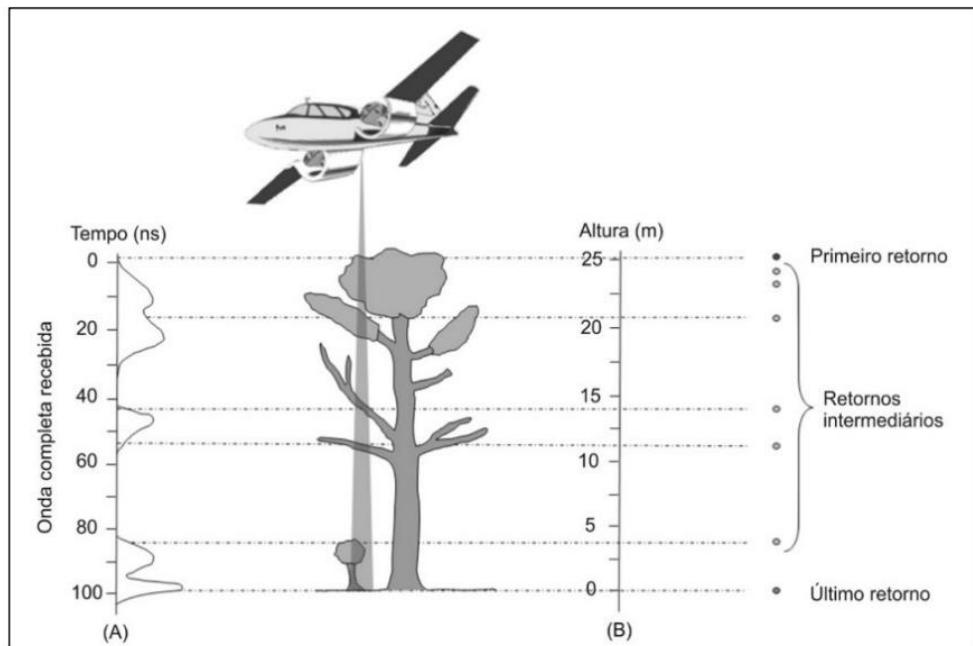


Figura 9: Características dos sistemas LiDAR

Fonte: GIONGO, et al. 2010

Uma importante limitação do laser que precisa ser ressaltada é que o ALS (Airborne Laser Scanning ou Laser Aerotransportado) reflete no espelho dos corpos d'água, ou seja, não penetra, tornando a medição impossível, conforme demonstrado na Figura 10. Existem diferentes sensores para penetração na água, que são os chamados lasers batimétricos (GLENNIE, 2013).

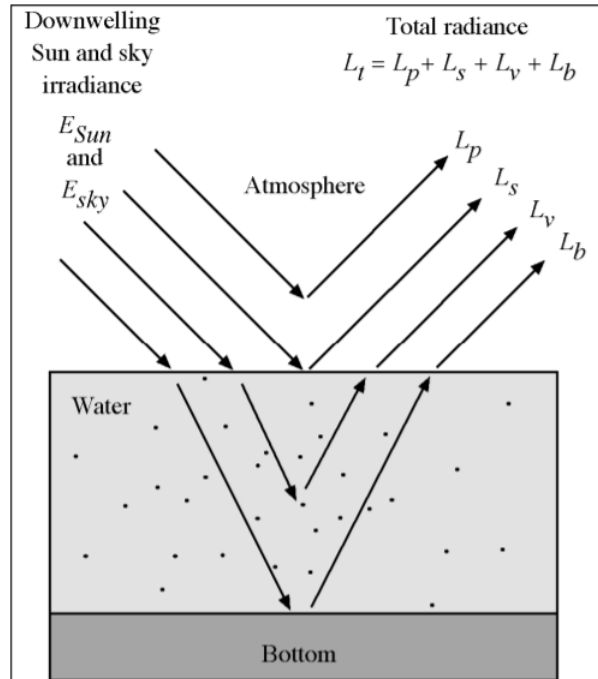


Figura 10: Interação do LiDAR com Corpos D'água

Fonte: Jensen (2011)

Como produto preliminar deste levantamento, são obtidos arquivos no formato ASCII (“*American Standard Code for Information Interchange*”; ou, em tradução livre, “*Código Padrão Americano para o Intercâmbio de Informações*”), também conhecido pelos profissionais da área como *nuvens de pontos* ou *arquivos xyz* (BRANDALIZE, 2015).

Estes arquivos contêm as informações de latitude, longitude e altitude de milhões de pontos, sendo cada ponto o retorno de um (1) pulso do laser, caracterizando a superfície do local sobrevoado.

Para a extração dos pontos correspondentes ao terreno, é necessária a aplicação de um algoritmo de “filtragem” ou “classificação”, conforme definem LOHMANN, BRIESE e PFEIFER (apud COELHO et al., 2002), responsável pela identificação dos pontos levantados, discriminando-os de acordo com a sua posição altimétrica no terreno (CORREA et al., 2017). O processo de filtragem é descrita com detalhes na metodologia, mas é importante destacar que nesta etapa, são excluídos pontos como pássaros voando, particulados atmosféricos, pontos que tiveram sua origem distorcida por interferências, etc.

Do resultado do processo de filtragem obtém-se o arquivo ASCII, que pode fornecer diversos tipos de produtos, e, neste caso, foram extraídos dois tipos de modelos: o Modelo Digital de Superfície (MDS — Comum o uso da nomenclatura em Inglês: *Digital Surface Model*, DSM) e o Modelo Digital de Terreno (MDT — Comum o uso da nomenclatura em inglês: *Digital Terrain Model*, DTM), conforme já demonstrado por FERREIRA (2014).

O MDS caracteriza os fenômenos incidentes na superfície, englobando feições naturais e artificiais, tais como vegetação e edificações. O MDT, por sua vez, caracteriza apenas os fenômenos incidentes na superfície nua do terreno. A acurácia destes modelos está fortemente vinculada ao algoritmo utilizado e ao percentual de pontos que retornam do solo (ZANDONÁ et al., 2003).

Utilizando a metodologia de processamento do DATA CARPENTRY (2019), os dados obtidos pelo LiDAR foram “filtrados” em MDS, como demonstrado na Figura 11, e em MDT, conforme apresentado na Figura 12 .

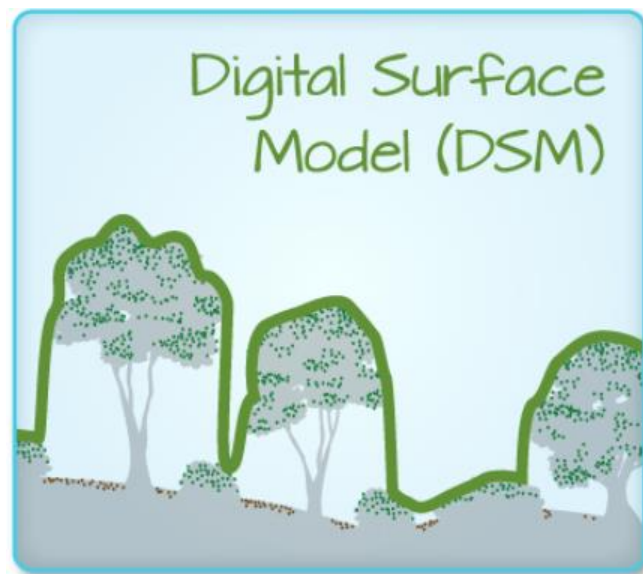


Figura 11: MDS

Fonte: Data Carpentry (2019)

Na Figura 10, previamente apresentada, é possível visualizar vários pontos verdes distribuídos nas copas das árvores, estes pontos representam o MDS. Também é possível ver pontos marrons no “solo”, ou o MDT, que é um subproduto

das nuvens de pontos obtidas através do perfilamento laser. Os laser-escâner utilizados emitem pulsos e conseguem “salvar” até quatro retornos destas ondas. O primeiro retorno é, a grosso modo, o MDS (Figura 11), e o último pulso de retorno tardio ao escâner seria o MDT (Figura 12).

De acordo com FELGUEIRAS e NAMIKAWA (2008), podemos definir o MDT como: “uma representação matemática da distribuição espacial da característica de um fenômeno vinculada a uma superfície real.” Ou, de acordo com BURROUGH (1986), como “Armazenamento de dados de altimetria para mapas topográficos”, em formatos específicos como nuvens de pontos ou matriz (Raster).

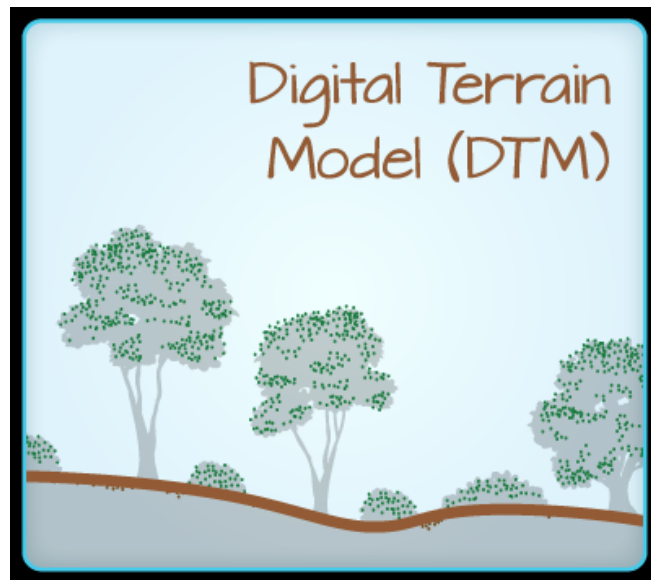
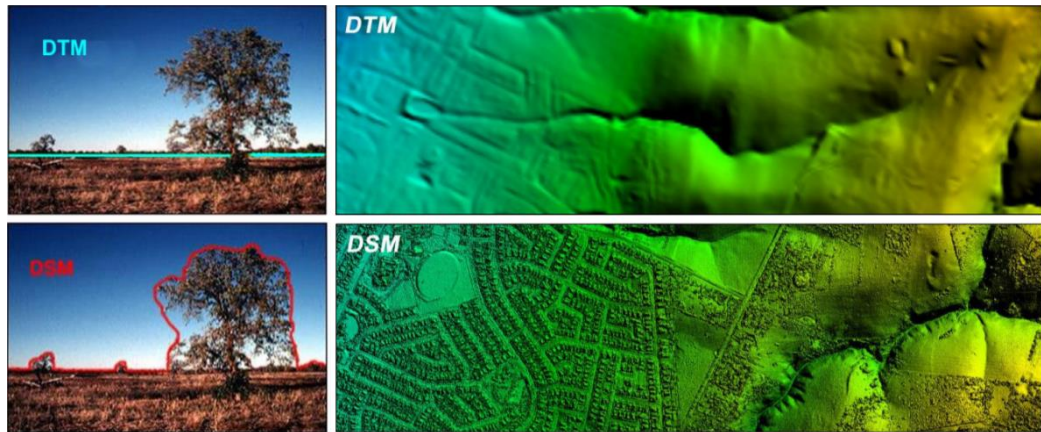


Figura 12: MDT

Fonte: Data Carpentry (2019)

As diferenças entre o MDT e o MDS são expressadas na comparação aplicada na Figura 13:



Fonte: <http://www.gisresources.com/confused-dem-dtm-dsm/>

Figura 13: Comparação entre MDT e MDS
Fonte: Saurabh Singh (2018)

As densidades das nuvens de pontos utilizados após todos os processos de filtragem (considerando que na prática nem todos os pulsos batem no terreno), têm, em média, quatro Pontos Por Metro² (4 PPM) no MDS. Este valor de resolução é pior nas regiões de grande declividade, cobertura vegetal densa, lagos, rios, entre outros fatores que possam interferir no retorno do laser.

Com os dados coletados e padronizados, são criadas as matrizes de representação de terreno, processo conhecido como “rasterização”. “Um gráfico Raster ou imagem Bitmap é uma estrutura de dados matricial que representa uma grade (...) retangular de pixels” (MICROSOFT, 2019). Ou seja, os dados são organizados em uma matriz regular onde o valor de cada pixel representa o valor de altitude do terreno, como demonstrado na Figura 14.

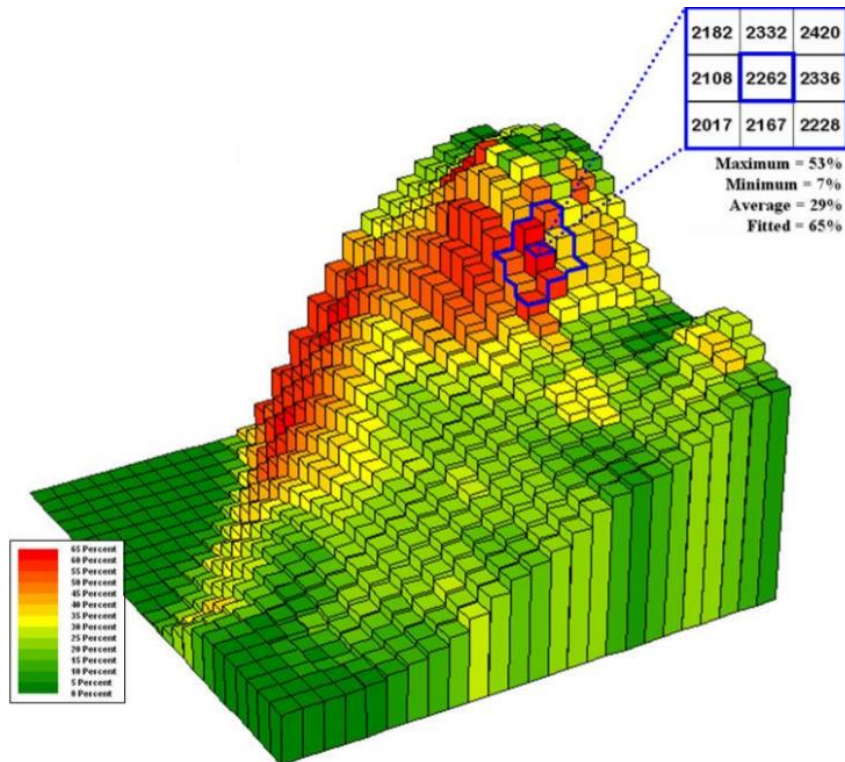


Figura 14: MDT

Fonte: Data Carpentry (2019)

Assim como o processo de filtragem, a alocação dos dados do LiDAR dentro de cada pixel da matriz é feita utilizando o *Eight Direction Pour Point Model* (Modelo de pontos de fluidez em oito direções) (OZDEMIR; BIRD, 2009), captando, além das informações do próprio quadrante, os dados dos quadrantes vizinhos no processamento do modelo conforme demonstrado na Figura 15.

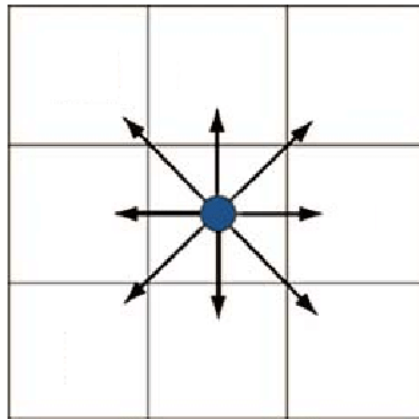


Figura 15: Modelo de pontos de fluides em oito direções (*Eight Direction Pour Point Model*)

Fonte: Hasan Ozdemir (Modificado por autor)

O modelo de pontos de fluides em oito direções foi concebido para análises envolvendo acúmulos hídricos, então, se faz necessário um processo de interpolação associado ao de coleta dos dados.

Métodos como *Krigagem* e “inverso do quadrado da distância”, conforme estudos de MASAHARU (2002), teriam critérios de incerteza altos para coleta de pontos e demandariam mais tempo, por isso foi aplicada a “interpolação por vizinho projetado”, conforme utilizada por FEITOSA (2019), pois:

- se vale dos pontos próximos ao ponto a ser estimado;
- faz uso da triangulação;
- é classificador determinístico, pois utiliza critérios puramente geométricos;
- não fornece medidas de sua incerteza.

Também é apontado que o diferencial da interpolação por vizinho projetado dos demais interpoladores com essas características é a forma como se dá a mensuração do ponto estimado, ao não utilizar pesos (FEITOSA, 2019).

4 Metodologia

A metodologia foi subdividida em duas etapas: uma etapa para os dados 2D e uma para os dados 3D. A análise 2D visou obter a representação em mapa das áreas

afetadas, gerando a nova poligonal de ADA; e a 3D visou o cálculo volumétrico que orientou as operações de resgate.

4.1 Metodologia dos dados 2D

A metodologia dos dados 2D segue o fluxo apresentado na Figura 16, sendo que cada item é detalhado no texto subsequente. A segunda parte do fluxo é apresentada no item 4.2 da metodologia.

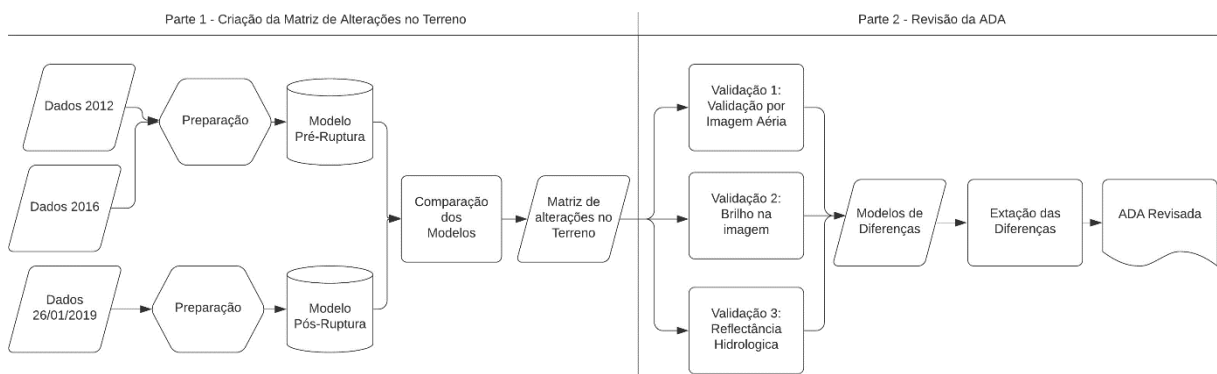


Figura 16: Fluxo dos dados 2D

Fonte: Rafael Freitas, 2020

O primeiro passo foi a obtenção dos dados de pré-ruptura, em que foi necessária a união de dois trabalhos diferentes. Nos anos de 2012 e 2016 foram realizados o mapeamento de laser e imagem-ótica aérea da região. Os dois levantamentos seguiram as mesmas premissas técnicas, garantindo a união dos trabalhos sem a necessidade de adaptações. A Figura 17 demonstra as regiões que cada trabalho cobriu, e a união (merge) dos trabalhos possibilitou a geração do MDT pré-ruptura de toda a região. Nota-se que o trabalho de 2016 se concentra em atualizar a região das estruturas da mina de Córrego do Feijão e áreas ao sul.

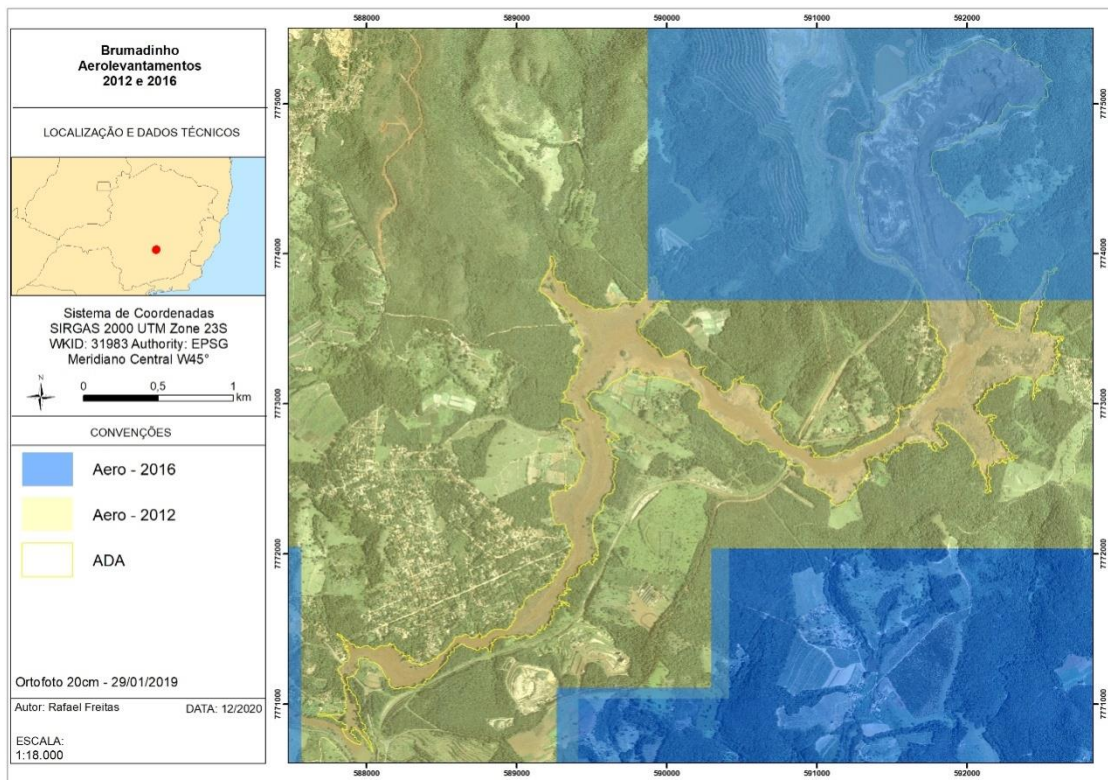


Figura 17: Captação dos Dados e suas Respectivas Datas

Fonte: Rafael Freitas (2020)

Como já mencionado anteriormente, os dados do pós-ruptura foram adquiridos no dia 26/01/2019, um (1) dia após a ruptura. Este trabalho cobriu a região de forma integral, utilizando os mesmos marcos topográficos e as mesmas premissas de escala e referências do pré-ruptura. Este cuidado permitiu os mesmos parâmetros de trabalho conforme observa-se na metodologia.

O processamento de milhões (talvez bilhão) de pontos pode ser um desafio computacional, por isto, foi demarcada a área ser processada, gerando um buffer de 100 metros da ADA feita anteriormente, e todos os cálculos foram delimitados dentro deste perímetro, como visto na Figura 18, que apresenta em amarelo a primeira poligonal de ADA e em vermelho o buffer idealizado.

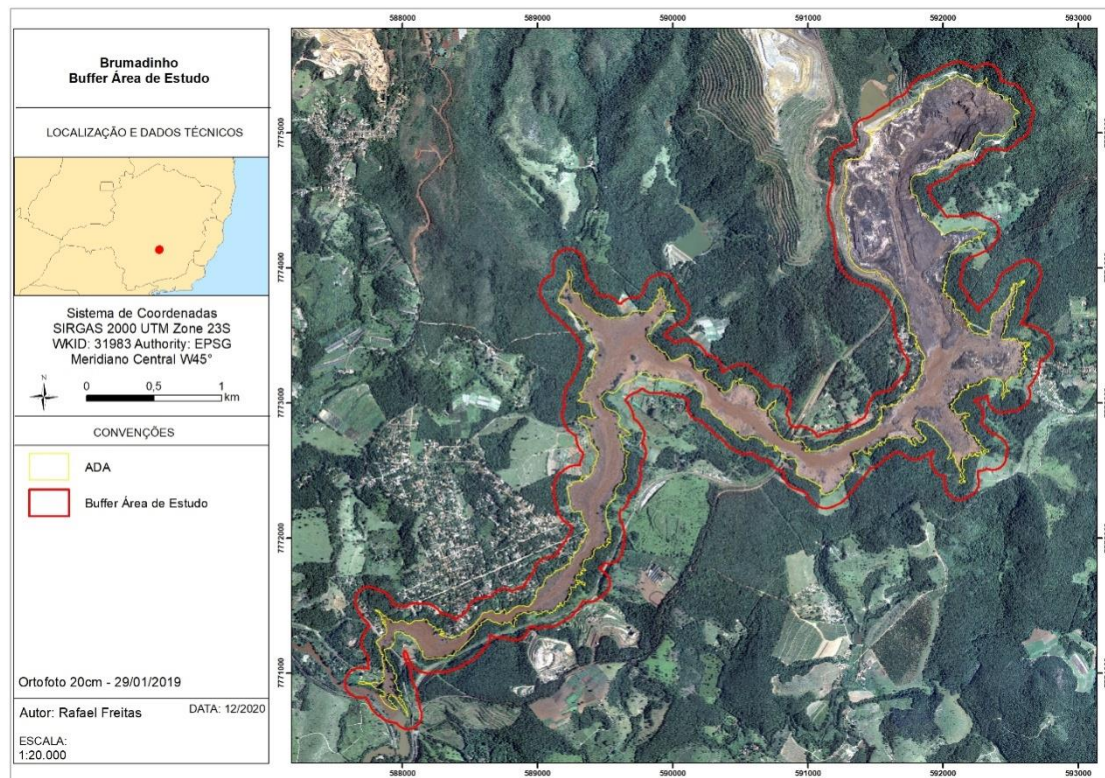


Figura 18: Área de Cálculo do Estudo

Fonte: Rafael Freitas (2019)

As nuvens de pontos do pré-ruptura e aquelas do pós-ruptura foram processadas para o formato "terrain" dentro de um geodatabase, e, posteriormente, em um modelo matricial (raster), usando o tamanho regular de pixel de três (3) metros.

O tamanho do pixel escolhido favorece o processamento rápido e mantém a melhor qualidade do produto conforme a PEC (Padrão de Exatidão Cartográfica), definida pelo CONCAR na Especificação Técnica para a Aquisição de Dados Geospaciais Vetoriais (MINISTÉRIO DA DEFESA, 2018) e na Norma da Especificação Técnica para Controle de Qualidade de Dados Geospaciais (MINISTÉRIO DA DEFESA, 2016).

Ao diminuir o tamanho do pixel, o tempo de processamento amplia-se de forma geométrica e dificilmente agregaria em dados utilizáveis.

Como já descrito acima, na normativa do CONAMA (2002), o perímetro da ADA será toda a alteração física ao terreno.

Ao calcular as diferenças de matrizes, como pode ser visto no exemplo ilustrativo da Figura 19, obtém-se o modelo denominado de *matriz de alterações do terreno*, que, na prática, nos informa a cota do antes menos a cota do depois do evento, evidenciando toda a alteração que ocorreu no terreno.

| | | | | | | | | | | |
|------------------------|---|---|---|-------------------------|---|---|---|--|---|---|
| 5 | 4 | 5 | - | 1 | 1 | 3 | = | 4 | 3 | 2 |
| 5 | 3 | 2 | | 1 | 2 | 1 | | 4 | 1 | 1 |
| 3 | 5 | 5 | | 1 | 4 | 2 | | 2 | 1 | 3 |
| Raster ANTES do evento | | | | Raster DEPOIS do evento | | | | Produto mostrando as alterações no terreno | | |

Figura 19: Cálculo de Matrizes

Fonte: GisGeography 2010 (Modificado por Rafael Freitas (2019))

4.2 Metodologia de Validação dos Dados 2D

Os valores obtidos na *matriz de alterações do terreno* foram categorizados em três grupos distintos, A, B e C, que facilitaram a interpretação dos dados obtidos.

A) Valores menores que zero (< 0):

Quando o resultado mostra uma diferença entre os dois modelos comparados (ou seja, a topografia está mais baixa do que antes). Neste cenário foram consideradas duas possibilidades:

- I) O rejeito erodiu parte do solo;
- II) área onde estava contido o rejeito inicialmente.

Delimitada a área onde estava a barragem através da imagem, todos os locais que divergissem deste foram considerados como o cenário I.

B) Valores maiores que zero (>0):

Quando o resultado obtido mostra um acréscimo ou acúmulo de material no local (ou seja, a topografia está mais alta do que antes).

C) Quando o resultado é igual a zero (0)

Neste caso, foram consideradas duas (2) hipóteses:

I) Não houve mudanças no terreno. O rejeito **não** passou no local e a área **não** deve fazer parte da ADA.

II) O rejeito passou, mas não deixou mudanças na topografia, representando um **falso negativo** e a área deve fazer parte da ADA.

Apesar de as chances de uma área ter tido ocorrência do material e não modificar a topografia em alguns centímetros para mais (representando acúmulo) ou para menos (representando uma erosão) aparentemente serem baixas, algumas técnicas foram utilizadas na tentativa de diminuir falsos negativos e estimar a probabilidade de ocorrer.

Esta análise foi muito importante, pois um falso negativo poderia gerar uma ADA de área menor que a realidade, e desta forma, foram utilizadas as três técnicas diferentes descritas a seguir:

1 - A primeira poligonal concebida da ADA, criada através de análise visual do ocorrido, foi usada como limite mínimo que a nova área iria conter. Caso a primeira poligonal de ADA apresentasse áreas não presentes na nova ADA, teríamos uma evidência da falha da técnica.

2 - A segunda técnica partiu da premissa de que o rejeito de minério de ferro contém água, e se quisermos identificá-lo de forma indireta, podemos fazer a busca por depósitos de água anormais na região.

Foi proposto no artigo “*Índice Indicador de Corpos d’água para imagens Multiespectrais*” (POLIDORIO; IMAI; TOMMASELLI, 2018) que imagens apresentam comportamentos distintos de brilho em locais que possuem água, permitindo, assim, a separação dos perímetros.

“Visto que a variabilidade na reflectância da água é muito pequena e que tais valores são decrescentes e que outras feições como a vegetação e o solo exposto tem a tendência de grandes aumentos de reflectância com o aumento do comprimento de onda da radiação eletromagnética, para computar um Índice Indicador de Água pela diferença normalizada deve-se usar uma lógica diferente daquela empregada no cômputo do NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), mas que tenha a capacidade de produzir resultados de destaque equivalentes (enquanto o NDVI destaca a vegetação, o IIA deve destacar a água).

(POLIDORIO; IMAI; TOMMASELLI, 2018, p3)

3 - A terceira técnica utilizada também buscou acúmulos de água para identificar a lama. Conforme apontado previamente, uma das limitações do LiDAR é a reflectância sobre a água (Figura 10), onde cai consideravelmente o retorno do sinal e, conseqüentemente, a densidade dos pontos (BORGES; SANO, 2014). Ao buscarmos onde o LiDAR apresenta interferência no sinal, estamos localizando de forma indireta prováveis locais onde há rejeito.

O esperado, pelo tamanho do pixel de 3m, é que após todos os processos de filtragem do laser, cada pixel contenha entre sete e onze pontos de retorno. A Figura 20 mostra um exemplo de contagem dos quadrantes, e a tabela anexa ao mapa demonstra quantos pontos têm em cada setor. Ainda é possível destacar que no quadrante 10 tem-se o resultado dos cálculos de todos os pontos dos quadrantes 3, 4, 5, 9, 10, 11, 15, 16 e 17. Assim são utilizadas as 79 coletas de dados diferentes para a criação do pixel do quadrante 10.

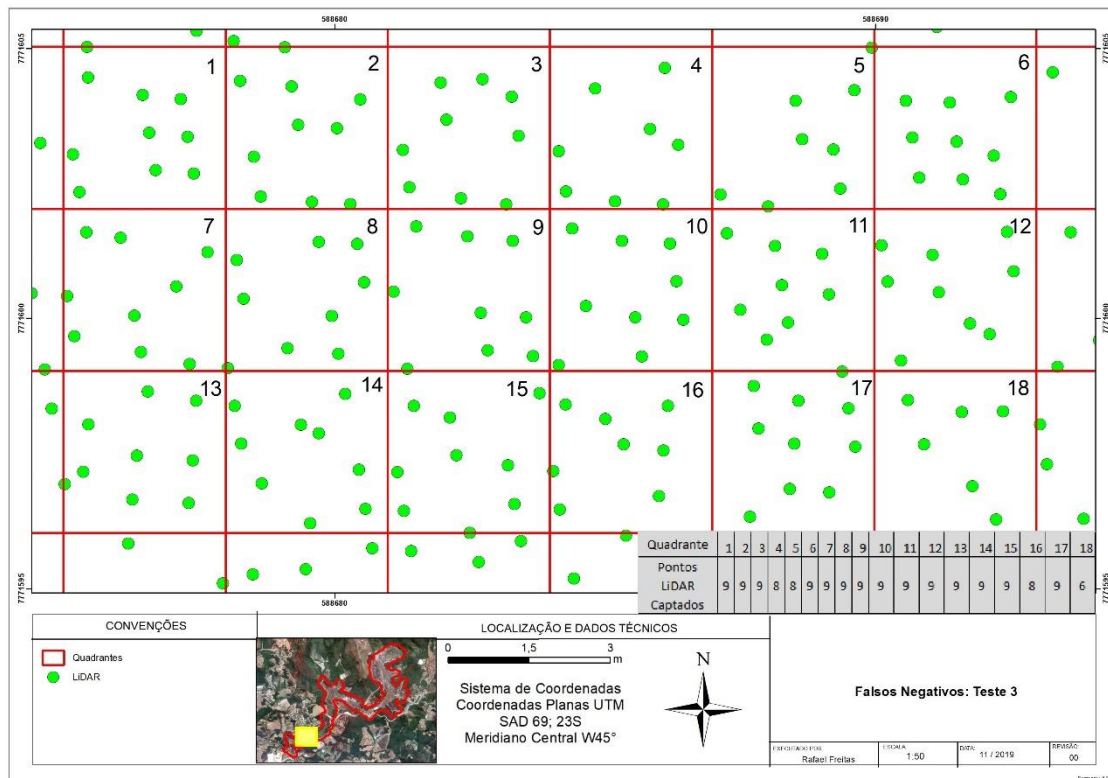


Figura 20: Mapa do Teste 3

Fonte: Rafael Freitas (2019)

Todos os pixels processados com menos informações que nove pontos, ou seja, menos que um (1) ponto por metro quadrado, e que estivessem na borda da ADA já delimitada deveria ser considerado um local com probabilidade de falso negativo e seria adicionado ao resultado.

As bordas arredondadas do limite apresentam áreas menores que os 9m², conforme demonstra a Figura 21. Por estarem longe da área de interesse e não comprometerem o resultado, elas foram excluídas do processo.

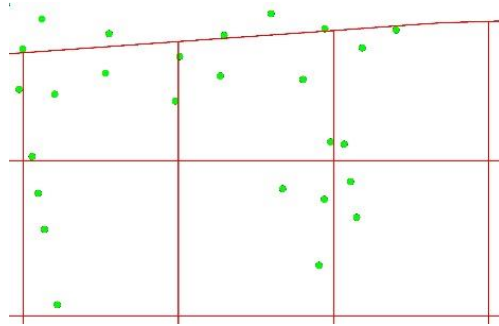


Figura 21: Borda do limite com quadrantes menores que 9m²

Fonte: Rafael Freitas (2019)

Os dados foram obtidos seguindo os padrões da PEC, revisados e validados por três equipes diferentes: a equipe que levantou os dados, a que os processou, e uma equipe de campo, não sendo necessária validação adicional.

Assim, é importante perceber que este trabalho não considerou um intervalo de erro ou imprecisões que o LiDAR possa ter obtido, já que a precisão deste produto é de milímetros, conforme medido por PEINHOPF (2014).

4.3 Metodologia para os cálculos volumétricos

Utilizando uma matriz regular de alterações no terreno, também é possível estimar o volume de cada pixel, para isso, cada pixel da matriz 2D passa pelo processo computacional conhecido como extrude. Os parâmetros foram imputados considerando que o $Volume = Comprimento \times Largura \times Altura$, conforme apresentado na Figura 22.

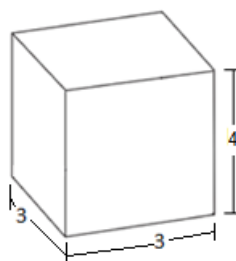


Figura 22: Cálculo do Volume

Fonte: Rafael Freitas (2019)

Os valores de Largura e Comprimento foram obtidos durante a etapa anterior, na criação do pixel regular, e foram definidos em 3 metros. A altura do bloco será o resultado do cálculo da diferença do terreno pré-ruptura e do pós-ruptura, ou seja, o resultado da matriz após as validações realizadas, como representado na Figura 23:

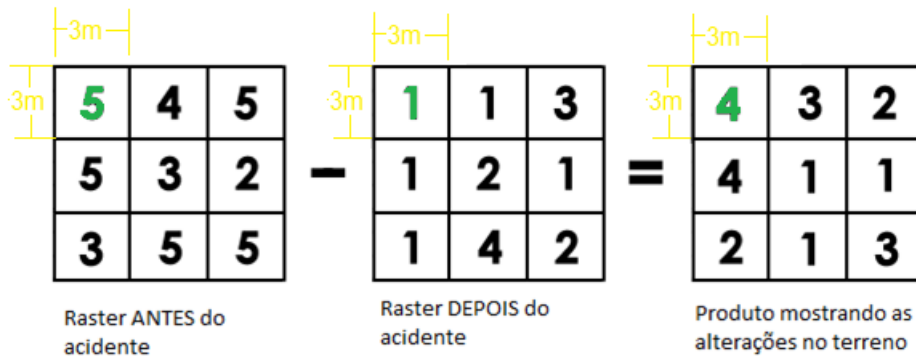


Figura 23: Cálculo do Volume 1

Fonte: GisGeography 2010 (Modificado por Rafael Freitas (2019))

O volume já é a informação necessária para orientar as operações de resgate, mas esta informação permite a extrapolação para se conseguir os valores aproximados da massa.

O cálculo médio de densidade do rejeito proposto por O'BRIEN e JULIEN (1984), de 2,72 g/cm³, apresentado no "*Physical properties and mechanics of hyperconcentrated sediments flows*" (Propriedades físicas e mecânicas de fluxos de sedimentos hiperconcentrados) foi aplicado ao cálculo anterior. Assim, tem-se:

$$\text{Massa} = \text{Comprimento (3m)} \times \text{Largura (3m)} \times \text{Altura (Figura 25)} \times 2,72 \text{ g/cm}^3.$$

Os dados obtidos serão comparados com os repassados pela Vale, aprovados pela Agência Nacional de Mineração (ANM) e publicados pela Agência Brasil, onde estima-se que havia 11,7 milhões m³ de rejeito contidos na barragem B1. Destes, 11,1 milhões foram liberados no evento e 600 continuaram retidos dentro do reservatório do barramento. Há de se considerar também que entre 300 e 350 mil metros cúbicos chegaram ao Rio Paraopebas (RODRIGUES, 2019), ficando fora dos limites estabelecidos para análise.

5 Resultados Obtidos

5.1 Resultados obtidos – Falsos negativos

Foram usados três artifícios diferentes para evitarmos falsos negativos e os resultados deles são apresentados abaixo:

A - Conferência pelo primeiro perímetro de ADA criado através de imagem aerolevantada.

Utilizar o primeiro perímetro de ADA criado pelo método de vetorização em imagem aérea não obteve ganhos de novas áreas, ou seja, é um demonstrativo visual de que a técnica funciona.

B - A segunda técnica, em que é analisado o brilho dos pixels para buscar concentrações de corpos hídricos escondidos por árvores, não foi bem-sucedida neste estudo.

O fim de janeiro e início de fevereiro de 2019 foi um período de fortes chuvas na região de Brumadinho, o que deixou toda a vegetação encharcada e interferiu no resultado esperado. A Figura 24 demonstra a precipitação neste período:

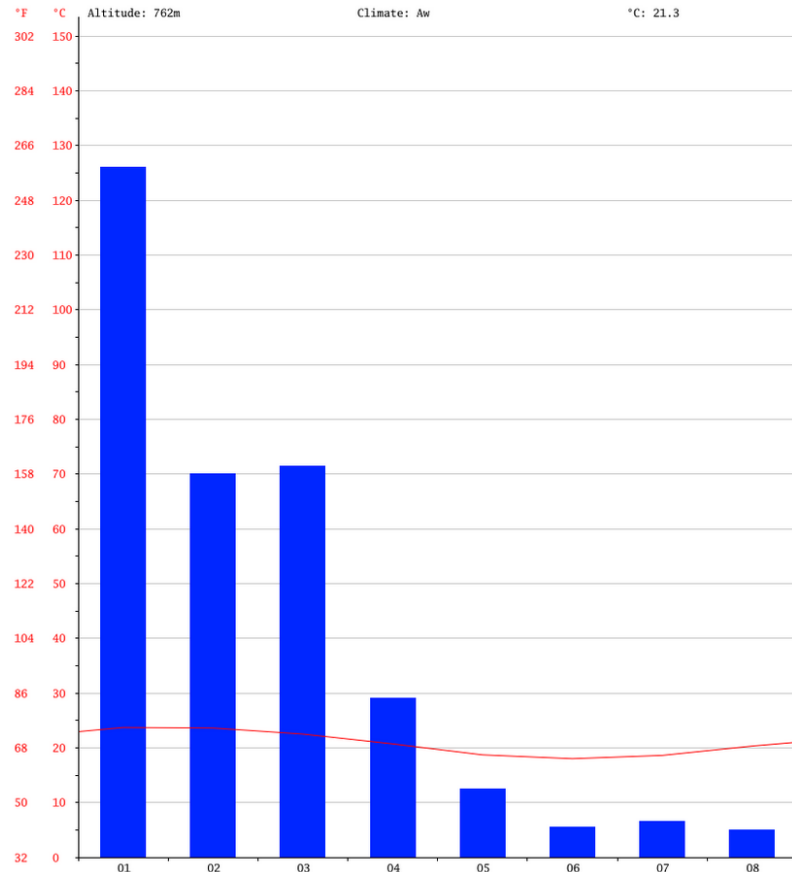


Figura 24: Pluviograma de Brumadinho 2019

Fonte: Climate Data ORG (09/2019)

C - No terceiro teste, em que se realizou a validação da penetração do LiDAR, houve acréscimo aproximado de área de 4 hectares, ou 4.500 pixels. Aqui, valida-se que existe inerência do rejeito no LiDAR e que a mesma pode ser usada para obtenção de informações importantes.

5.2 Resultados obtidos - Novo Limite Obtido de ADA

A Área Diretamente Afetada foi ampliada em 20,5 hectares, representando um aumento de 8,5% sobre o primeiro perímetro gerado. A Figura 25 destaca em vermelho todas as áreas acrescentadas.

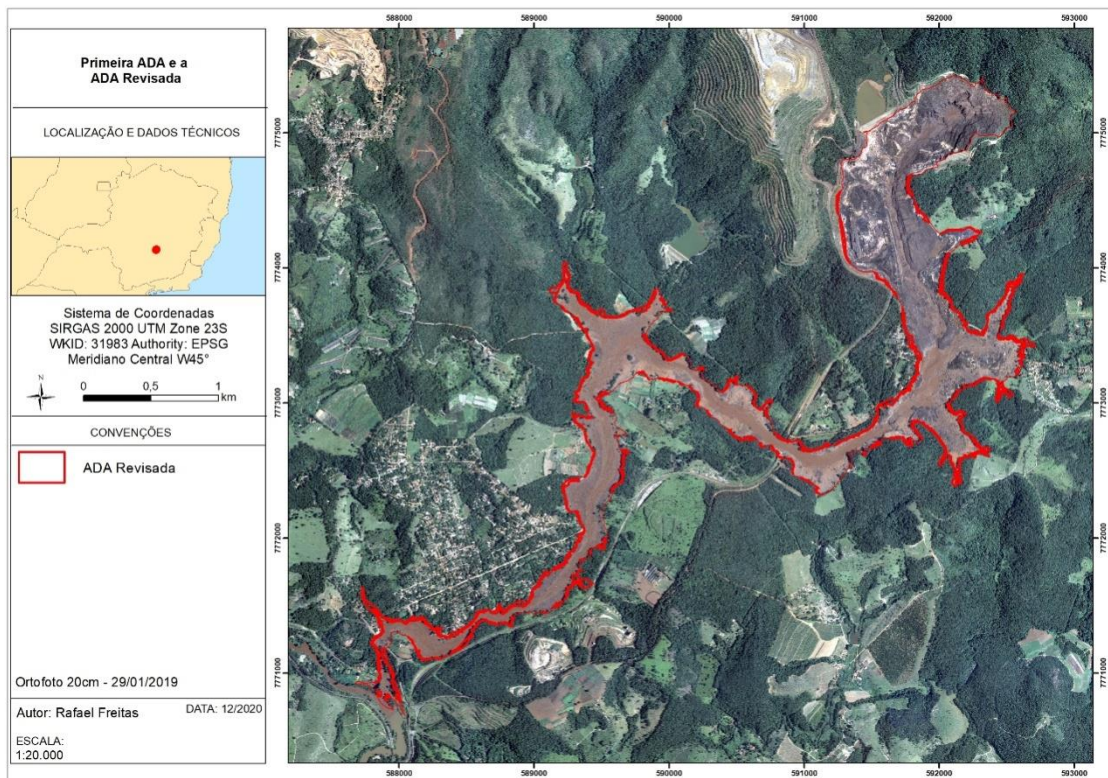


Figura 25: ADA Revisada

Fonte: Rafael Freitas (2019)

Para analisar os resultados, o capítulo 5.3 apresenta uma comparação entre a poligonal obtida por vetorização em imagem aerolevantada e a obtida neste estudo.

5.3 Resultados obtidos – Comparação entre os limites das ADAs

Na Figura 26, tem-se a comparação entre a primeira ADA apresentada e o novo perímetro gerado. As partes assinaladas em vermelho representam as áreas incluídas na poligonal.

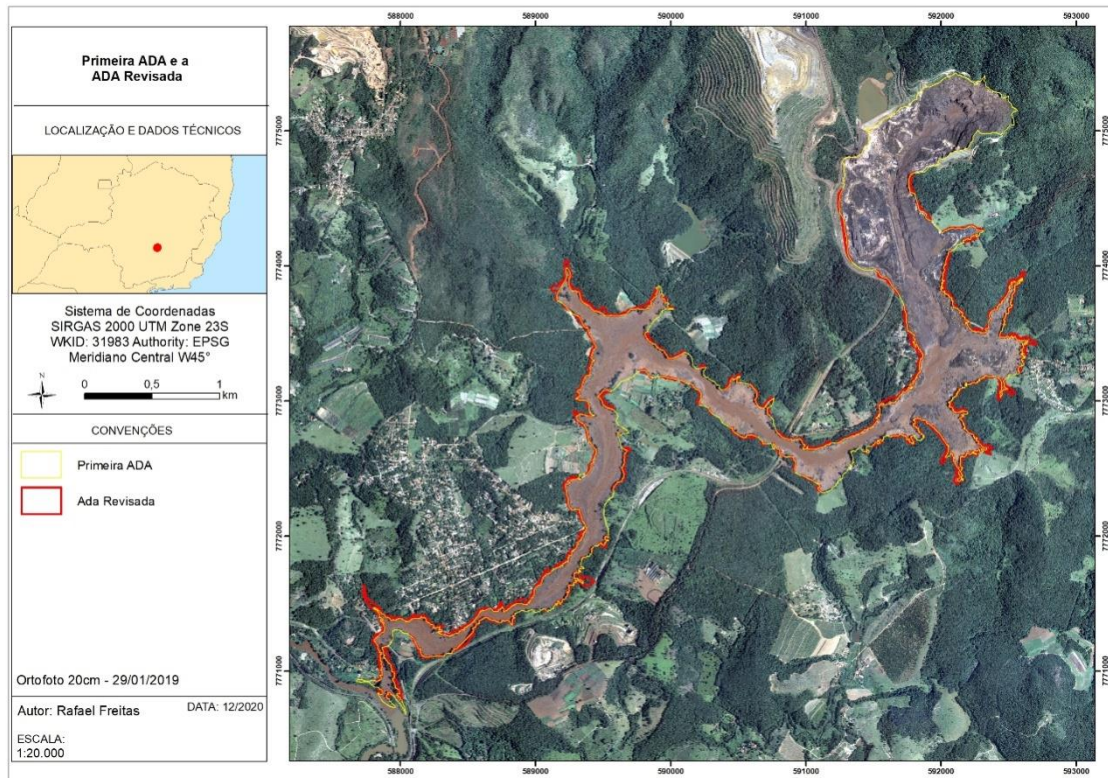


Figura 26: Primeira ADA e a ADA Revisada

Fonte: Rafael Freitas (2019)

A Figura 27 destaca apenas as diferenças entre os perímetros, avultando áreas onde a nova ADA apresentou ganho de áreas.

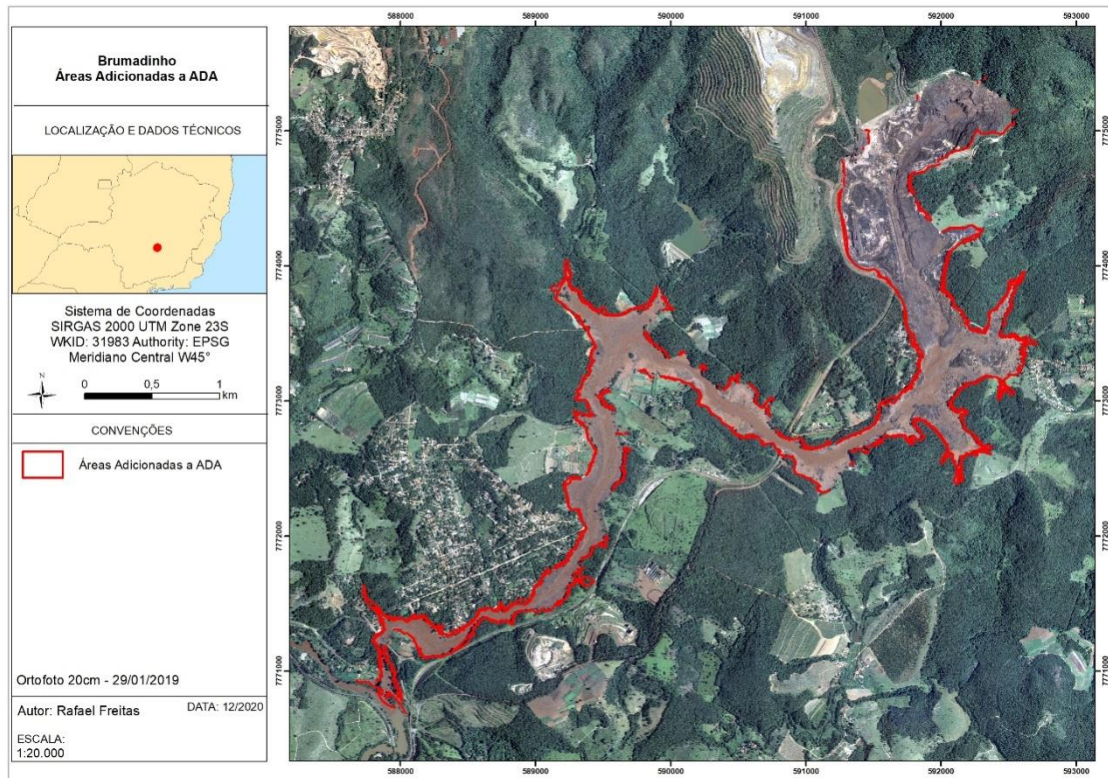


Figura 27: Áreas adicionadas à nova ADA

Fonte: Rafael Freitas (2020)

Em destaque na Figura 28 estão os limites adicionados concentrados em regiões com vegetação densa, locais em que a técnica de vetorização sob imagem de satélite apresenta baixa acurácia, e área sem vegetação, onde os limites se coincidem.

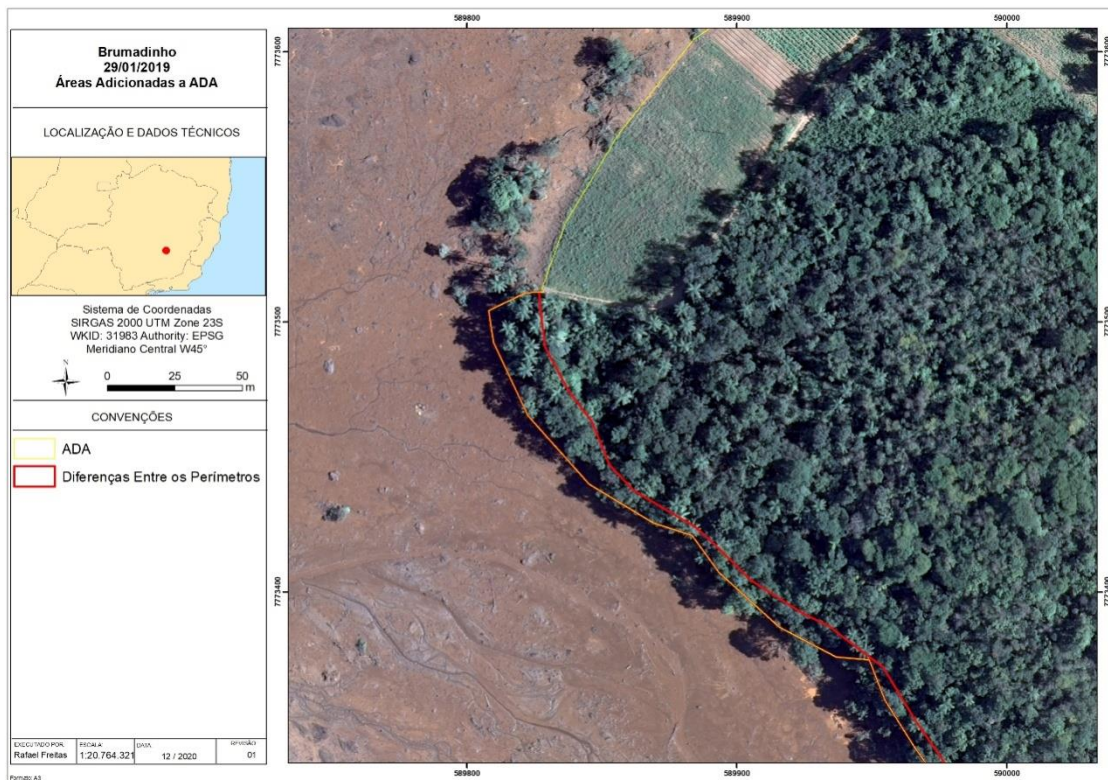


Figura 28: Áreas adicionadas à nova ADA - Zoom

Fonte: Rafael Freitas (2020)

O acréscimo de 20,5 hectares impactados representa uma diferença de 8,5% a mais de áreas a serem incluídas na ADA. 4 hectares vieram da terceira etapa de validação, ou seja, 19,5% do que foi incluído na ADA vieram de validações.

5.4 Resultados Obtidos - Modelos Altimétricos e Volumétricos

Os cálculos representando as diferenças altimétricas do rejeito na região da ruptura são apresentados na Figura 29. As manchas azuis mostram os locais onde o terreno ficou mais “baixo” e houve provável perda de material, enquanto os locais com cores quentes representam onde o terreno ficou mais “alto” e houve provável acúmulo de material.

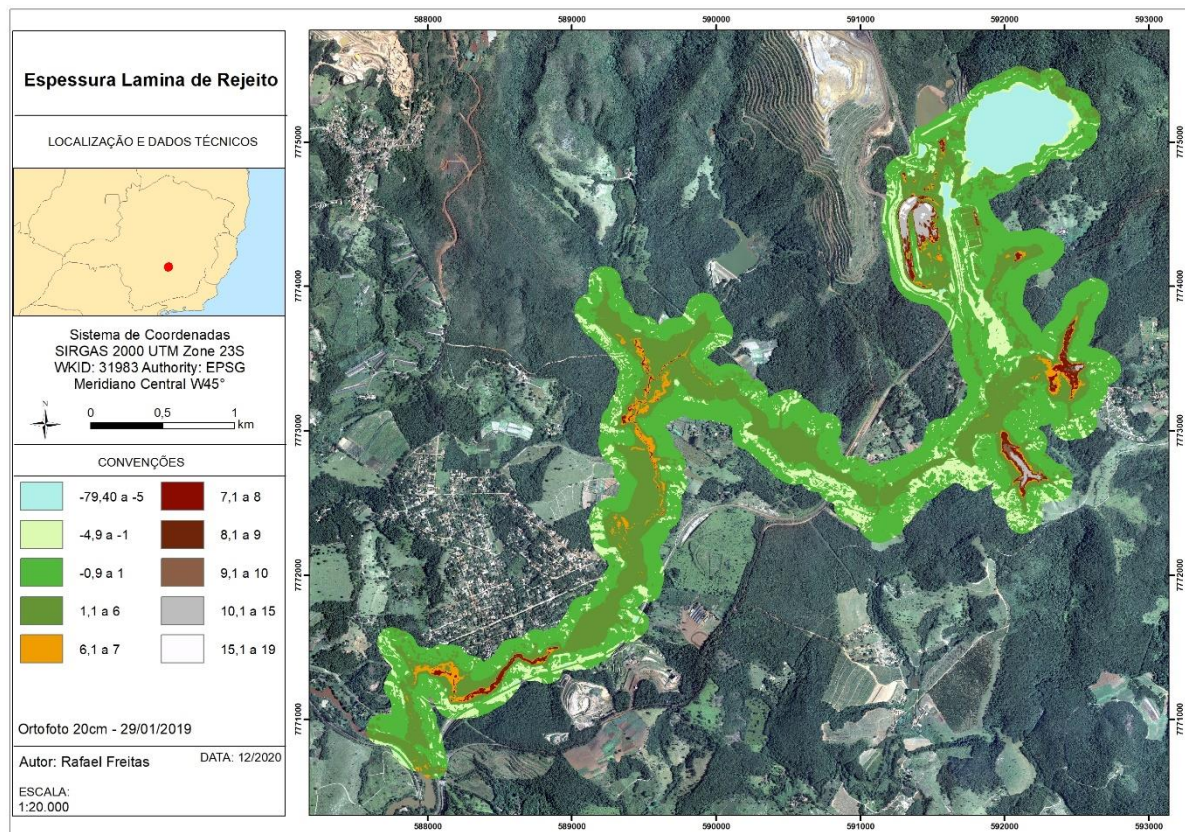


Figura 29: Espessura da lâmina de rejeito

Fonte: Rafael Freitas (2019)

A perda altimétrica está concentrada em duas regiões principalmente: no reservatório, de onde o material saiu, com alteração de quase -80 metros na cota, e no pátio de estoque. Para o pátio de estoque, é importante lembrar que a área é modificada diariamente, com material sendo armazenado para posterior carregamento ao trem. Uma comparação entre modelos desta área em específico teria que levar em conta fatores não verificados neste estudo.

Também encontramos erosões nas bordas do modelo, causadas provavelmente pela força de arraste do rejeito. Na Figura 30 temos um zoom da área descrita:

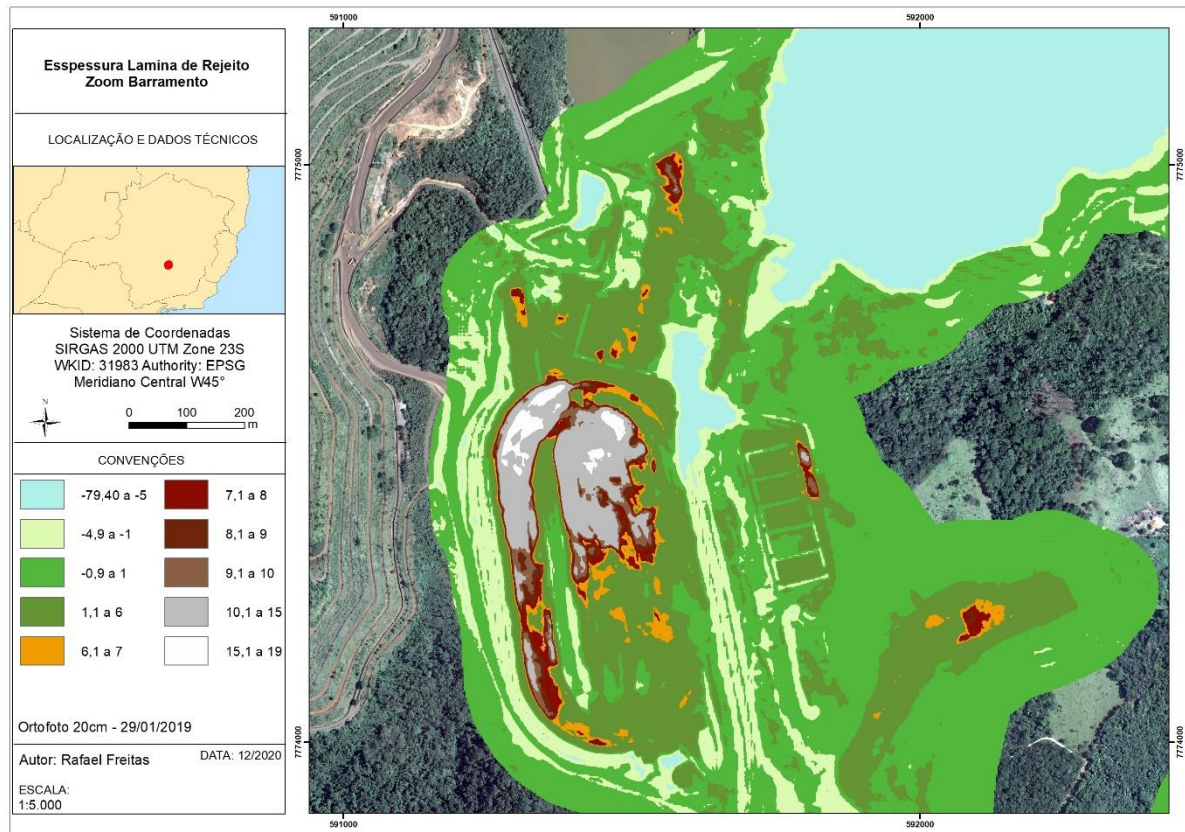


Figura 30: Espessura lâmina de rejeito (Zoom barramento)

Fonte: Rafael Freitas (2019)

O espalhamento do rejeito encontrou alguns padrões a serem observados: o rejeito respeitou os elementos fisiográficos, retendo-se diante de anteparos e se espalhando pela bacia de inundação do Ribeirão Ferro Carvão, conforme demonstrado na Figura 31.

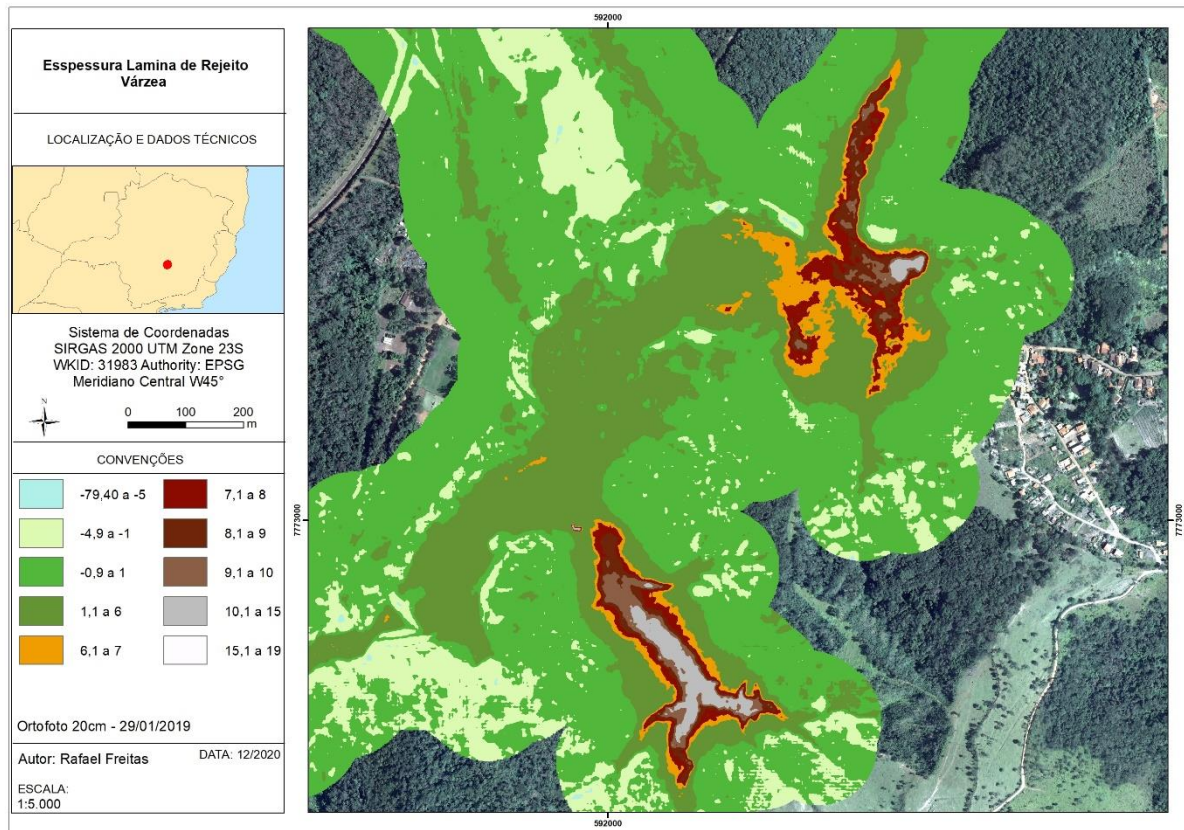


Figura 31: Espessura da lâmina de rejeito

Fonte: Rafael Freitas (2019)

Uma das principais funções destes mapas era definir a espessura de rejeito depositado onde era terreno natural e quanto faltava para alcançá-lo. Entender quais áreas devem receber determinados equipamentos, evitando que veículos pesados atuem em áreas em que haveria o risco de afundamento. O uso adequado dos recursos nos locais certos pode economizar recursos e dar foco a segurança das equipes que atuam no local.

Além da profundidade, também foi gerada uma prévia volumétrica do rejeito, como apresentado na Figura 32. A união das duas informações permite que as equipes de resgate prevejam a profundidade e o volume a serem movidos, bem como a escolha dos equipamentos adequados para a operação.

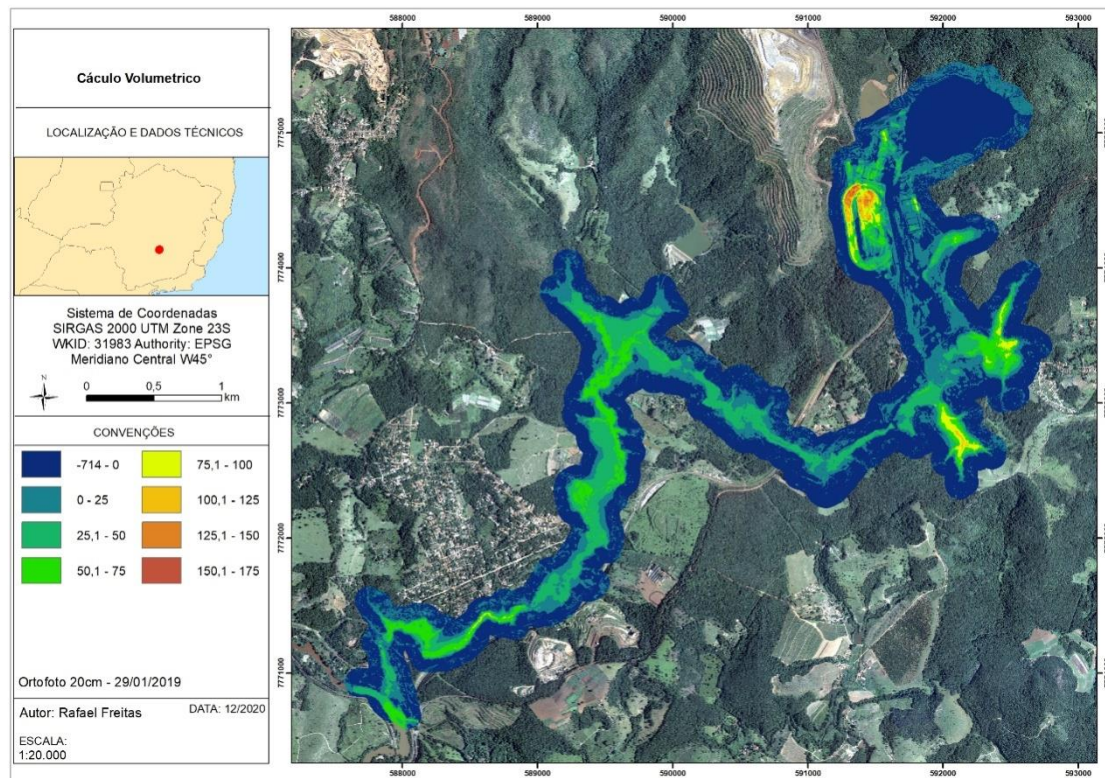


Figura 32: Cálculo Volumétrico 1

Fonte: Rafael Freitas (2019)

Com o raster obtido, também é possível calcular o volume total da ruptura através desta técnica. Ao somar todos os pixels de ganho ou perda de material, obtemos o valor aproximado de 9 milhões de m³, ou seja, 2.1 milhões a menos do que o valor oficial de 11.1 milhões.

Importante lembrar alguns fatores:

- O modelo apresentado vai até o limite com o Rio São José do Paraopeba, então, todo material que passou deste limite ficou fora da análise. Pelos dados oficiais, entre 300 e 350 mil toneladas não são analisadas.
- O rejeito que continuou contido dentro do barramento também não é analisado nesta técnica. Para isto, teríamos que comparar os dados com a topografia “original”, de antes da construção do barramento.
- Utilizou-se um valor médio para o rejeito, e conforme descrito na metodologia, é um material que apresenta características muito dispares, então, uma margem de erro era esperada.

- Valores volumétricos incorporados pelo arrasto do rejeito são agregados ao todo.

6 Considerações Finais

A parte jurídica da definição de uma ADA hoje é regida principalmente pela Legislação Geral do Licenciamento Ambiental, o CONAMA e o IBAMA, mas outros adendos podem ser encontrados em outros órgãos, como o IPHAN (Instrução normativa 1, de 25 de março de 2015). Entidades estaduais e federais são livres para criarem complementos sempre que acharem necessário, e assim o fazem atualmente.

Tantos textos e órgãos diferentes legislando sobre o mesmo tema podem causar confusões jurídicas complexas (como a já citada previamente sobre poluição atmosférica). Uma reforma na legislação ambiental é de extrema importância para sanar estas questões.

A proteção adequada do meio ambiente sustentável deve enquadrar os 3 pilares: os econômicos, os ambientais e os sociais. Uma legislação complexa torna o processo caro, burocrático, lento, e exclui a sociedade de entender o rito jurídico.

Após o decreto 9.672, de 2 de janeiro de 2019, a comissão do congresso que avaliava a reforma na legislação foi dissolvida e não há previsão no momento de uma retomada das atividades.

No caso deste estudo, todos os órgãos competentes aprovaram tecnicamente e juridicamente a delimitação da ADA, sendo este um indício de que a técnica foi bem-sucedida.

No método de vetorização sobre imagem aerolevantada existem fatores humanos que influenciam o traçado do perímetro, como: pressa, escala de trabalho escolhida (normalmente convencionadas em 1:5.000 ou 1:10.000), cansaço, estresse, divergências de interpretações, etc.

A mecanização do processo faz com que os dados sofram menos interferências humanas garantindo um resultado mais adequado à sociedade.

Todos os mapas e dados foram repassados aos bombeiros e defesa civil assim que concluídos, sendo mais uma ferramenta utilizada nas buscas no local. Saber previamente quanto material será retirado modifica completamente o planejamento

das operações. Com o conhecimento prévio, caminhões e áreas eram preparadas a fim de se evitar que as operações parassem em algum “gargalo”.

Conforme apontado previamente, mostrou-se ineficiente o resultado da vetorização em imagem de satélite, assim como mostrou-se inviável, por questões de segurança, sua alternativa, o caminhamento em campo. A técnica em estudo possibilitou remover equipes de campo e deixar de expô-las a riscos desnecessários, além de viabilizar a entrega dos dados dentro dos prazos solicitados e não atrapalhar as operações de buscas.

Também devemos considerar que o perímetro da nova ADA é de 34,6 km o que levaria aproximadamente 1 mês de trabalho, não atendendo aos prazos. Se o trabalho fosse dividido em várias equipes, além de possíveis erros ao se juntar os dados, haveria locais onde o acesso não permitiria a realização de um bom trabalho.

O mapeamento mais detalhado da ADA permite à empresa Vale/S.A poder se planejar financeiramente sobre quantos hectares vão necessitar de intervenção para cumprir as condicionantes, possibilitando o devido planejamento financeiro e de campo.

Os cálculos volumétricos ficaram muito próximos da realidade, foram entregues após algumas horas da chegada dos dados LiDAR e foram usados para planejamento de campo das equipes nos primeiros momentos.

Os cálculos volumétricos apresentados podem ser aplicados em outros eventos semelhantes de grandes deslocamentos de massas de terra em geral como terremotos, sismos, desmoronamentos, etc.

Não estão disponíveis dados LiDAR de alta qualidade em muitas áreas, e como descrito, para aplicação deste método, eles são necessários, sendo este um limitante.

Sendo o ideal a prevenção deste tipo de ocorrência, ter os dados LiDAR das regiões de maior risco geotécnico pode auxiliar em diagnósticos urbanos essenciais à boa gestão urbana e territorial. A falta destes dados é um dos sintomas da falta de planejamento do Estado para áreas de risco.

O novo perímetro auxiliou as equipes de resgate no planejamento de novas áreas em que precisam atuar. As operações de buscas também obtiveram condições prévias do terreno, melhorando o planejamento, dando agilidade ao processo.

Os custos para obtenção de dados laser de alta qualidade ainda são elevados, mas conforme prevê a lei de Moore, em que a capacidade dos equipamentos eletrônicos dobra a cada ano e seu preço e tamanho são reduzidos gradualmente, é possível prever que a tecnologia seja cada vez mais acessível com o passar do tempo.

Hoje, já é possível encontrar sensores LiDAR diminutos a ponto de caberem em drones e RPAs (*Robotic Process Automation*). A eliminação da necessidade de aviões no processo o deixará ainda mais barato, rápido e prático, bem como a utilização de multissensores que possibilitem a captação de dados para a elaboração de processo de classificação e mapas temáticos que atendam às necessidades das mais diversas aplicações e temas evolucionados.

Em áreas de 2km², foi possível realizar um teste em que em 15 minutos após descarregarmos os dados do drone, já tínhamos os modelos prontos. Com avanços tecnológicos, o drone poderá ir na frente das equipes, realizar o levantamento de dados, repassar as informações via 5G, os dados serem processados em nuvem, que repassará os mapas e informações às equipes antes de eles chegarem ao local. Todas as tecnologias mencionadas já existem, falta a criação das conexões entre os procedimentos necessários para que isto ocorra.

Os dados de pré-ruptura podem ajudar na recuperação da área, já que a topografia original do local foi reconstruída com detalhes.

Sobre a segunda técnica de validação deste trabalho, em que o excesso de água inviabilizou a análise de brilho da imagem, parte dos deslizamentos de terra no Brasil são em decorrência de fortes chuvas, inviabilizando a técnica para este propósito.

A terceira técnica de validação, na qual se avalia a penetração do laser, foi, entre as 3 validações, a que apresentou melhor resultado. Ela exige muito processamento computacional, já que faz análises pixel a pixel dentro de uma nuvem contendo milhões de pontos, e neste trabalho, foram necessárias aproximadamente 40 horas de uma workstation.

Quase 20% das áreas encontradas vieram desta etapa de validação, sendo significativa para a concepção do perímetro final.

Esta técnica tem potencial para otimização utilizando tecnologias de processamento por setor, clipagem, *point count*, *convertsevent*, entre outras metodologias, reduzindo muito a necessidade computacional.

A argumentativa de que outros fatores podem ter influenciado no baixo retorno do laser em algumas regiões, como alta densidade arbórea, lagos, etc., é desmistificada pela concentração das áreas encontradas estarem próximas aos limites da ADA. Se estes fatores tivessem exercido influência, teríamos pixels dispersos no modelo e a técnica seria ineficiente. Pesquisas futuras sugerem a aplicação de metodologias para a validação dos mapas temáticos, tais como pela utilização de índices globais, locais, índice kappa e estatísticas com emprego do índice de Pearson ou similares.

Poligonais geradas através de imagens aerolevadas dependem muito da qualidade da imagem obtida. O tamanho de pixel pode ser determinante para uma boa interpretação dos dados e neste trabalho foi utilizada uma imagem de pixel 0,5m. Quanto menor o pixel da imagem, maior o custo, e por isto, o mercado convencionou o uso de imagens de pixel maiores — de 5, 10 ou 15 metros, normalmente —, chegando a um custo benefício mais adequado. Análises de ADA com imagens de qualidade inferior certamente trarão resultados diferentes. Assim, é difícil determinar qual imagem uma pessoa deve utilizar para cada análise, ficando a cargo do empreendedor a escolha. Sendo esta uma informação vital e básica, deixá-la aberta ao empreendedor pode ser um risco ao Estado.

Imagens também dependem de luz solar para sua obtenção, clima favorável, densidade atmosférica, céu sem nuvens, etc. Após obtidas e tratadas, seu uso ainda depende da interpretação de mão de obra especializada. Estes fatores são contornados com a utilização de sensores e mecanização do processo.

Conforme apontado previamente, a legislação ambiental carece de reformas e as mesmas estão paralisadas. Eventualmente, a pauta verde entra novamente em discussão e as reformas irão acontecer. Uma das reformas necessárias é a padronização do que é entregue ao Estado.

Hoje, cada parte interessada faz suas entregas aos órgãos ambientais utilizando metodologias diferentes, desde que apresentem os parâmetros mínimos

exigidos. Estes parâmetros são antigos e não condizem com as tecnologias mais utilizadas nos últimos 15 anos.

A mecanização do processo apresentada pode ser inserida em uma legislação que utilize parâmetros claros e facilmente atualizáveis com a tecnologia, o que garantiria ao Estado uma metodologia padrão para obtenção de informações relevantes sobre o território aos custos dos empreendedores.

7 Referências Bibliográficas

ALMEIDA, Fabiano Costa; FERREIRA, Daniel Assumpção Costa. **Geoprocessamento e sensoriamento remoto aplicado a recursos hídricos**. 2012. Disponível em: <<https://capacitacao.ana.gov.br/conhecerh/handle/ana/98>>. Acesso em: 8 fev. 2021.

ARCADIS, Empresa; TETRAPAN, Empresa. DIAGNÓSTICO DAS ÁREAS DE INFLUÊNCIA (AII, AID E ADA): FRIGORÍFICO E CADEIA PECUÁRIA ASSOCIADA. **Repórter Brasil**, Pará, v. 1, n. 1, p. 1-5, jan. 2010. Disponível em: <<https://reporterbrasil.org.br/documentos/bertin/bertin-estudo4.1ao4.3.pdf>>. Acesso em: 28 nov. 2019.

BORGES, Elane Fiúza; SANO, Edson Eyji. Séries temporais de EVI do Modis para o mapeamento de uso e cobertura vegetal do oeste da Bahia. **Boletim Ciências Geodésicas**, Curitiba, v. 20, n. 3, p. 526-547. Set. 2014. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1982-21702014000300526&lng=pt&nrm=iso>. Acesso em 24 out. 2020.

BRANDALIZE, Amauri Alfredo. **Perfilamento a LASER: Comparação com Métodos Fotogramétricos**. 1. ed. [S.l.: s.n.], 2015. p. 2-8.

BRASIL. DECRETO Nº 89.817, DE 20 DE JUNHO DE 1984. **Diário Oficial da União**: Brasília, 20 de junho de 1984; 163º da Independência e 96º da República. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/1980-1989/D89817.htm> Acesso em: 17 ago. 2020.

_____. DECRETO Nº 9.672, DE 2 DE JANEIRO DE 2019. **Diário Oficial da União**: Brasília, 2 de janeiro de 2019. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2019-2022/2019/decreto/D9672.htm> Acesso em: 20 ago. 2020.

_____. DECRETO Nº 6.660, DE 21 DE NOVEMBRO DE 2008. **Diário Oficial da União**: Brasília, 21 de novembro de 2008. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2008/Decreto/D6660.htm>. Acesso em: 15 dez. 2020.

_____. LEI Nº 12.651, DE 25 DE MAIO DE 2012. **Diário Oficial da União**: Brasília, 25 de maio de 2012; 191º da Independência e 124º da República. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12651.htm> Acesso em: 18 out. 2020.

_____. LEI Nº 4.771, DE 15 DE SETEMBRO DE 1965. **Diário Oficial da União**: Brasília, 15 de setembro de 1965; 144º da Independência e 77º da República. Disponível em: <<https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/1960-1969/lei-4771-15-setembro-1965-369026-publicacaooriginal-1-pl.html>>. Acesso em: 9 set. 2020.

_____. LEI Nº 11.428, DE 22 DE DEZEMBRO DE 2006. **Diário Oficial da União:** Brasília, 22 de dezembro de 2006. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2006/lei/l11428.htm>. Acesso em: 15 dez. 2020.

BURROUGH, P.A. **Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment**. Oxford: Oxford University Press, 1986.

CAR. **Cadastro Ambiental Rural**. 2020. Disponível em: <<https://www.car.gov.br/publico/imoveis/index>>. Acesso em 13 nov. 2020.

CLIMATE-DATA. **Gráfico de temperatura Brumadinho**. Disponível em: <<https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/minas-gerais/brumadinho-25043/#climate-graph>>. Acesso em: 28 nov. 2019.

COELHO, Alexandre Heringer et al. **Utilização do método de pirâmide de imagens para a extração de modelos digitais de terreno de imagens geradas por dados de laser scanner**. In: Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário, 2002, Florianópolis. Disponível em: <<http://www.lidar.com.br/arquivos/PiramidesLASER.pdf>>. Acesso em 15 out. 2020.

CONAMA. **Resolução nº 28, de 7 de dezembro de 1994**. Diário Oficial da União, Brasília, v. 28, n. 248, p. 21348-21349, dez./1994. Disponível em: <https://www.mma.gov.br/estruturas/202/_arquivos/conama_res_cons_1994_028_estgi_os_sucessionais_de_florestas_al_202.pdf>. Acesso em: 4 nov. 2019.

_____. **Resolução nº 305, de 12 de junho de 2002**. Diário Oficial da União, Brasília, v. 2002, n. 7, jul./2002. Disponível em: <https://www.mma.gov.br/estruturas/biosseguranca/_arquivos/71_01122008102705.pdf>. Acesso em 16 out. 2020.

_____. **Resolução nº 349, de 16 de agosto de 2004**. Disponível em: <https://www.mpsp.mp.br/portal/pagr/portal/cao_urbanismo_e_meio_ambiente/legislacao/leg_federal/leg_fed_resolucoes/leg_fed_res_conama/ResolCONAMA-349-04.pdf>. Acesso em: 14 set. 2019.

_____. **Resolução nº 392, de 25 de junho de 2007**. Disponível em: <<https://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=6991>>. Acesso em: 10 nov. 2020.

CONCAR. Comissão Nacional de Cartografia. 2020. Disponível em: <<https://www.concar.gov.br/detalheDocumentos.aspx?cod=8&ln=1>>. Acesso em: 18 set. 2020

CORREA, M. D. A; LINGNAU, Christel; FRANCISCO, Cristiane Nunes; FERREIRA, L. D. C. M. **Extração automática de rede de drenagem gerada a partir de dados obtidos por perfilamento a laser: geotecnologias e modelagem espacial em geografia**

física. XVII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada, Campinas, v. 1, n. 1, p. 5044-5056, jul. 2017.

DATA CARPENTRY. **RasterCalculations in R**. Disponível em: <<https://datacarpentry.org/r-raster-vector-geospatial/04-raster-calculations-in-r/index.html>>. Acesso em: 28 nov. 2019.

FEITOSA, José Antoniel Campos. **Interpolação por vizinho projetado**. XX COBREAP – Congresso Brasileiro de Engenharia de Avaliações e Perícias. Bahia: 2019. Disponível em: <<http://www.mrci.com.br/AO-14-Interpola%C3%A7%C3%A3o-Por-Vizinho-Projetado.pdf>>. Acesso em 5 mar. 2021.

FELGUEIRAS, Carlos; NAMIKAWA, Laercio. **Aula 8 – Modelagem Numérica**. 2008. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/spring/teoria/aula8.pdf>> . Acesso em: 15 out. 2020.

FERREIRA, Gilberlan de Freitas. **Emprego de simulação no controle de qualidade em cartografia aplicado a modelos digitais de superfícies oriundos de sensores orbitais segundo foco PEC-PCD**. Recife, 121p. Dissertação (mestrado) - UFPE, Centro de Tecnologia e Geociências, Programa de Pós-graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias Da Geoinformação, 2014. Disponível em: <<https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/10738>>. Acesso em: 20 dez. 2020.

FIORIO, Vivian. **Como calcular o metro cúbico (m³)**. 4 fev. 2015. Disponível em: <<https://industriaohje.com.br/como-calcular-o-metro-cubico-m%C2%B3>>. Acesso em: 24 set. 2020

GALVÃO, Daniel; WETERMAN, Daniel. **Barragem em Brumadinho tem volume de 12,7 milhões de m³ de rejeito de mineração**. UOL, 2019. Disponível em: <<https://noticias.uol.com.br/ultimas-noticias/agencia-estado/2019/01/25/barragem-em-brumadinho-tem-volume-de-1-milhao-de-m-de-rejeito-de-mineracao.htm?cmpid=copiaecola>>. Acesso em: 28 nov. 2019.

GIS GEOGRAPHY. **Map Algebra: Global, Zonal, Focal and Local Operations**. Disponível em: <<https://gisgeography.com/map-algebra-global-zonal-focal-local/>>. Acesso em: 25 nov. 2019.

GIONGO, et al. **LiDAR: princípios e aplicações florestais**. 2010. Disponível em <https://www.researchgate.net/publication/228630890_LiDAR_principios_e_aplicacoes_florestais>. Acesso em 24 nov. 2020.

GLENNIE, C. L. et al. **Geodetic imaging with airborne LiDAR: the Earth's surface revealed**. 2013. Disponível em: <stacks.iop.org/RoPP/76/086801>. Acesso em: 12 fev. 2021.

GONÇALVES JR., Valter. Mudanças do governo no meio ambiente serão analisada pelo novo Congresso. **Agência Senado**. Jan. 2019. Disponível em:

<<https://www12.senado.leg.br/noticias/materias/2019/01/31/mudancas-do-governo-no-meio-ambiente-serao-analisadas-pelo-novo-congresso-1>>. Acesso em: 28 ago. 2020.

GROSENHAUGH, L. R. Avoiding dendrometry bias when trees lean or taper. **Forest Science**, v. 26, n. 2, p. 203-215, 1980.

INPE. **Modelagem Digital de Terreno**. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/spring/teoria/mnt/mnt.htm>>. Acesso em: 28 nov. 2019.

JENSEN, Jennifer. et. al. Evaluation of the MODIS LAI product using independent lidar-derived LAI: A case study in mixed conifer forest. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, n. 12, p. 3625-3639, 2011. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0034425711003270>>. Acesso em: 5 dez. 2020.

JORNAL ESTADO DE MINAS. **Acidente em Brumadinho é destaque na imprensa internacional**. Disponível em: <https://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2019/01/25/interna_gerais,1024647/acidente-em-brumadinho-e-destaque-na-imprensa-internacional.shtml>. Acesso em: 28 nov. 2019.

LHCOLUS. **Serviços**. 2010. Disponível em: <lhcolus.com.br/servicos>. Acesso em: 5 set. 2020.

MASAHARU, Hiroshi; OHTSUBO, Kazuyuki. **A filtering method of airborne laser scanner data for complex terrain**. Toyo University, Tokyo, v. 305, n. 811, p. 1-5, jan. 2002. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Hiroshi_Masaharu/publication/241633666_A_filtering_method_of_airborne_laser_scanner_data_for_complex_terrain/links/0f31753b346f85bc3d000000/A-filtering-method-of-airborne-laser-scanner-data-for-complex-terrain.pdf>. Acesso em: 28 nov. 2019.

MICROSOFT. **Types of Bitmap**. 2019. Disponível em: <<https://docs.microsoft.com/en-us/dotnet/desktop/winforms/advanced/types-of-bitmaps?view=netframeworkdesktop-4.8>> Acesso em: 27 nov. 2020.

MINAS GERAIS. **Decreto 35624 de 08/06/94**. 1994. Disponível em: <https://www.almg.gov.br/consulte/legislacao/completa/completa.html?tipo=Dec&numero=35624&ano=1994&aba=js_textoOriginal>. Acesso em: 15 dez. 2020.

_____. **Decreto 37812 de 08/03/96**. 1996. Disponível em: <<https://www.almg.gov.br/consulte/legislacao/completa/completa.html?tipo=DEC&numero=37812&ano=1996>>. Acesso em: 15 dez. 2020.

_____. **Lei nº 20.922, de 16 de outubro de 2013.** 2013. Disponível em: <<http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=30375>>. Acesso em 15. dez. 2020.

_____. **Portaria IEF nº 107, de 27 de dezembro de 2018.** 2018. Disponível em: <<http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=47480>>. Acesso em 15. dez. 2020.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES. **Instrução Normativa IBAMA nº 11, de 05.12.2003.** Disponível em: <<http://www.oads.org.br/leis/1118.pdf>>. Acesso em: 27 nov. 2019.

MINISTÉRIO DA CULTURA. **Instrução Normativa IPHAN nº 1, de 25.03.2015.** Disponível em: <http://portal.iphan.gov.br/uploads/legislacao/INSTRUCAO_NORMATIVA_001_DE_25_DE_MARCO_DE_2015.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2020.

MINISTÉRIO DA DEFESA. **Norma da Especificação Técnica para Controle de Qualidade de Dados Geoespaciais.** 1.ed. 2016. Disponível em: <http://www.geoportal.eb.mil.br/portal/images/PDF/ET_CQDG_1a_edicao_2016.pdf>. Acesso em: 5 fev. 2021.

_____. **Norma da Especificação Técnica para Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais.** 2018. Disponível em: <http://www.geoportal.eb.mil.br/portal/images/PDF/ET-ADGV_3.0_211218.pdf>. Acesso em: 5 fev. 2021.

MORAES, Marcos Ronei. **Sensoriamento Remoto e Classificação de Imagens;** Departamento de Estatística CCEN – UFPB Campus I - João Pessoa, 1999.

MOURÃO, Roberto M.F. **Torres e Passarelas de Copada .** Canopy Towers & Walkways. 2015. Disponível em: <<http://www.ecobrasil.eco.br/30-restrito/categoria-conceitos/1232-trilhas-torres-e-passarelas-de-copada-canopy-towers-walkways>>. Acesso em: 30 set. 2020.

NASA. **Shuttle Laser Altimeter.** 1999. Disponível em: <<https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19990087525/downloads/19990087525.pdf>>. Acesso em: 8 fev. 2021.

O'BRIEN, J.S.; JULIEN, P.Y. **Physical properties and mechanics of hyperconcentrated sediment flows.** Logan: Utah State University. 1984. Disponível em: <<https://www.tib.eu/en/search/id/BLCP%3ACN006200643/Physical-Properties-and-Mechanics-of-Hyperconcentrated>>. Acesso em: 1 set. 2020.

OZDEMIR, Hasan; BIRD, Deanne. Evaluation of morphometric parameters of drainage networks derived from topographic maps and DEM in point of floods. **Environmental Geology.** v. 56, p. 1405-1415, 2009. Disponível em: <[10.1007/s00254-008-1235-y](https://doi.org/10.1007/s00254-008-1235-y)>. Acesso em: 26 set. 2020.

PEINHOPF, C. et al. **Determinação da precisão de dados LiDAR analisados com fusion para medição de alturas em plantios florestais**: XI Seminário de Atualização em Sensoriamento Remoto. São Paulo, v. 1, n. 1, p. 314-319, mar. 2014. Disponível em: <<http://plutao.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/plutao/2015/01.14.16.38/doc/Caciane,%202014.pdf?metadataarepository=&mirror=iconet.com.br/banon/2006/11.26.21.31>>. Acesso em: 14 mar. 2020.

POLIDORIO, Airton Marco; IMAI, Nilton Nobuhiro; TOMMASELLI, A. M. G. Índice indicador de corpos d'água para imagens multiespectrais. **Fotogrametria e Sensoriamento Remoto**, Universidade Estadual de Maringá, v. 1, n. 1, p. 1-1, nov. 2019. Disponível em: <<https://www3.ufpe.br/cgtg/ISIMGEO/CD/html/Fotogrametria%20e%20Sensoriamento%20Remoto/Artigos/f027.pdf>>. Acesso em: 28 nov. 2019.

RODRIGUES, Leo. Vale anuncia início de dragagem para retirar lama do Rio Paraopeba. Brasília: **Agência Brasil**, 2019. Disponível em: <<https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2019-08/vale-anuncia-inicio-de-dragagem-para-retirar-lama-do-rio-paraopeba>>. Acesso em: 13 ago. 2020.

SANTANA, D.S., et al. **Estimação de trajetórias utilizando sistema de navegação inercial strapdown**. In: XV Congresso Brasileiro de Automática. 2004 p.1-6.

SAURABH, Singh. **Confused Between DEM, DTM and DSM!**. 2018. Disponível em: <<http://www.gisresources.com/confused-dem-dtm-dsm/>>. Acesso em: 1 out. 2020.

SCARINI, Juliana; RODRIGUES, Bruno. Tragédia na Serra do Rio completa 5 anos e ainda há espera por ajuda. **G1 - PORTAL DE NOTÍCIAS**, 2016. Disponível em: <<http://g1.globo.com/rj/regiao-serrana/noticia/2016/01/tragedia-na-serra-do-rio-completa-5-anos-e-ainda-ha-espera-por-ajuda.html>> . Acesso em: 1 dez. 2019.

SILVA, Cristiano Alves; et al. Avaliação da acurácia do cálculo de volume de pilhas de rejeito utilizando VANT, GNSS e LiDAR. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, v. 22, n. 1, p. 73-94, Mar. 2016. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1982-21702016000100073&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 20 nov. 2020

VIANINI NETO, L. **Estudo de ruptura da barragem da Pampulha, em Belo Horizonte: retroanálise da brecha do acidente de 1954 e ruptura hipotética nas condições atuais**. 2016. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/1843/BUBD-AUAGVF>>. Acesso em: 8 fev. 2021.

WEHR, Aloysius; LOHR, Uwe. Airborne laser scanning: an introduction and overview. **ISPRS**, Germany, v. 54, n. 2, p. 68-82, jun. 1999.

ZANDONÁ, Daniele Felix; MÜLLER, Mauricio; MARTINS, M. A. R. **Avaliação da precisão altimétrica do mapeamento digital a laser em áreas de cobertura vegetal**

densa. Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, v. 1, n. 1, p. 16-21, abr. 2005.