

- imagem do satélite WorldView-3 capturada em 05/04/2020 (T3), com características espaciais, espectrais, radiométricas semelhantes a imagem anterior (T2);
- Modelo Digital de Terreno oriundo de aeroperfilamento por laser realizado entre os anos de 2012 e 2016, com resolução espacial de 0,66m e 32 bits;
- Modelo Digital de Terreno oriundo de aeroperfilamento⁶ por laser realizado em 26 de janeiro de 2019, com resolução espacial de 0,66m e 32 bits;
- Modelo Digital de Terreno oriundo de aeroperfilamento por laser realizado em 08 de março de 2020, com resolução espacial de 0,66m e 32 bits.

A preparação dos dados incluiu em um primeiro momento a delimitação da sub-bacia do Ribeirão Ferro-Carvão e adição das áreas referentes as ETAFS. De posse da então definida área de estudo, foi possível proceder com os respectivos recortes geográficos das imagens orbitais para satisfazer a área de estudo, bem como estabelecer critérios de distribuição espacial dos pontos de apoio geodésico para controle de qualidade posicional do projeto e planejamento do aerolevanteamento por drone e da respectiva distribuição dos pontos de controle temático.

3.1.1. Delimitação da área de estudo

A delimitação da sub-bacia foi motivada pela baixa aderência entre os limites da sub-bacia provenientes da base de dados do Instituto Mineiro de Gestão das Águas, derivado de bases cartográficas em escala 1:50.000, e a morfologia do relevo passível de mapeamento através dos Modelos Digitais de Terreno (MDT) utilizados no presente projeto. Desta forma, para garantir a qualidade cartográfica dos produtos compatíveis à escala 1:10.000, recorreu-se a ferramentas morfométricas de modelagem digital de superfície para determinar o polígono da sub-bacia do ribeirão Ferro-Carvão.

Para a delimitação utilizou-se o MDT anterior ao rompimento da barragem (oriundo de um mosaico de aerolevanteamentos com sensor laser (LIDAR) datados entre 2013 e 2016 e com resolução espacial (GSD) de 50cm. As ferramentas utilizadas foram o *Fill*, para preenchimento

⁶ Processo de levantamento da superfície do terreno e dos obstáculos dispostos sobre a mesma (edificações, vegetação, postes, cabos, veículos, etc) que utiliza instrumentos capazes de calcular a distância entre a aeronave e os diferentes pontos imageados na superfície através de feixes de laser.



de depressões, o *Flow Direction* para determinação das linhas de drenagem e o *Basin* para cálculo do polígono envolvente da bacia, da *toolbox Hydrology* do *Spatial Analyst* da plataforma ESRI ArcGIS. O polígono calculado para a sub-bacia apresentou área de 3321,86ha, pouco superior aos 3208,15ha da sub-bacia proveniente do IGAM (ottocodificação N. 7496732). Contudo, a inclusão das duas Estações de Tratamento de Afluentes Fluviais (ETAF), uma localizada próximo a foz do ribeirão Casa Branca e a outra localizada na margem oposta do rio Paraopeba próximo a foz do ribeirão Ferro-Carvão, aumentou a área de estudo. Considerando então o limite calculado da sub-bacia e as áreas respectivas das duas ETAFs, foi acrescentado uma faixa de adicional de tolerância de 100m (*buffer*), resultando em um polígono com área de 3932,43ha. A Figura 1 ilustra os polígonos supracitados.

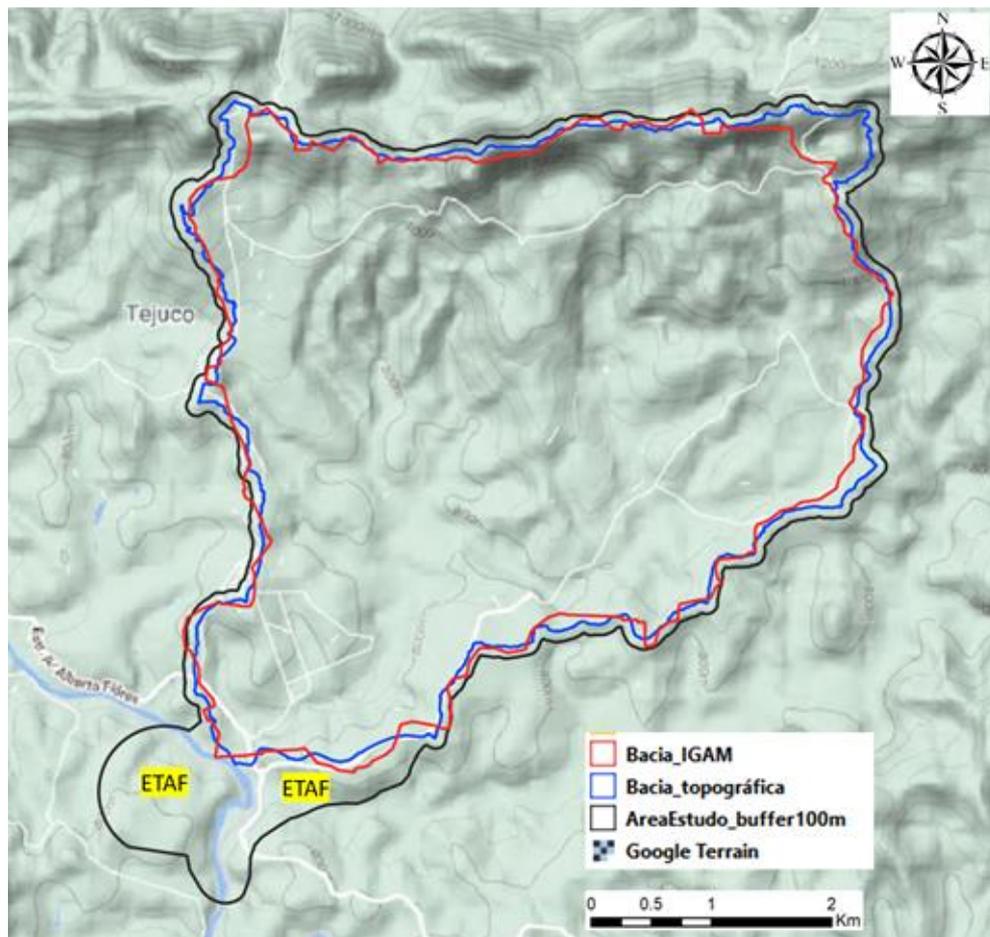


Figura 1 – Representação dos polígonos da sub-bacia do Ribeirão Ferro-Carvão e da delimitação da área de estudo a qual comporta um buffer de 100m sobre o polígono que envolve a sub-bacia topográfica e as Estações de Tratamento de Águas Fluviais



3.1.2. Preparação das imagens, modelo digital de superfície e mapas de declividade

Uma vez definido o polígono da área de estudo, este foi utilizado para recorte dos dados geográficos para início do mapeamento. O recorte geográfico dos dados recorreu a ferramentas elementares como *Raster_Clip* da plataforma ESRI arcGIS e do QGIS. Os pixels externos à área de estudo foram rotulados como *NoData*, o que na prática os desconsidera qualquer que for o geoprocessamento a que a imagem for submetida. A operação foi iniciada pela imagem T3 (Figura 2) posto a necessidade de planejar as operações de campo e de fomentar o processo de validação das classes de cobertura do solo a partir da cena mais recente. Na sequência foram recortadas as demais imagens e os MDTs.



Imagem Worldview-3 (T3 – 05/04/20)



Recorte da imagem Worldview-3 (T3 – 05/04/20)

Figura 2 – Imagem Worldview-3 (05/04/2020) antes e após o recorte.

Sendo o mapeamento e quantificação das Áreas de Preservação Permanentes (APPs), um dos objetivos do Subprojeto #2, e considerando que esse mapeamento é uma tarefa independente do mapeamento das classes de cobertura e de uso do solo em desenvolvimento, foi iniciada uma série de processamentos suplementares, sobretudo apoiados nos MDTs de alta resolução disponíveis para uso no presente projeto, com destaque para o cálculo das superfícies de declividade do terreno, que recorreu a ferramenta *Surface_Slope* da *Toolbox Spatial Analyst* do ESRI arcGIS. A Figura 2 ilustra os MDTs e respectivos mapas de declividade de terreno para as três datas consideradas no estudo.



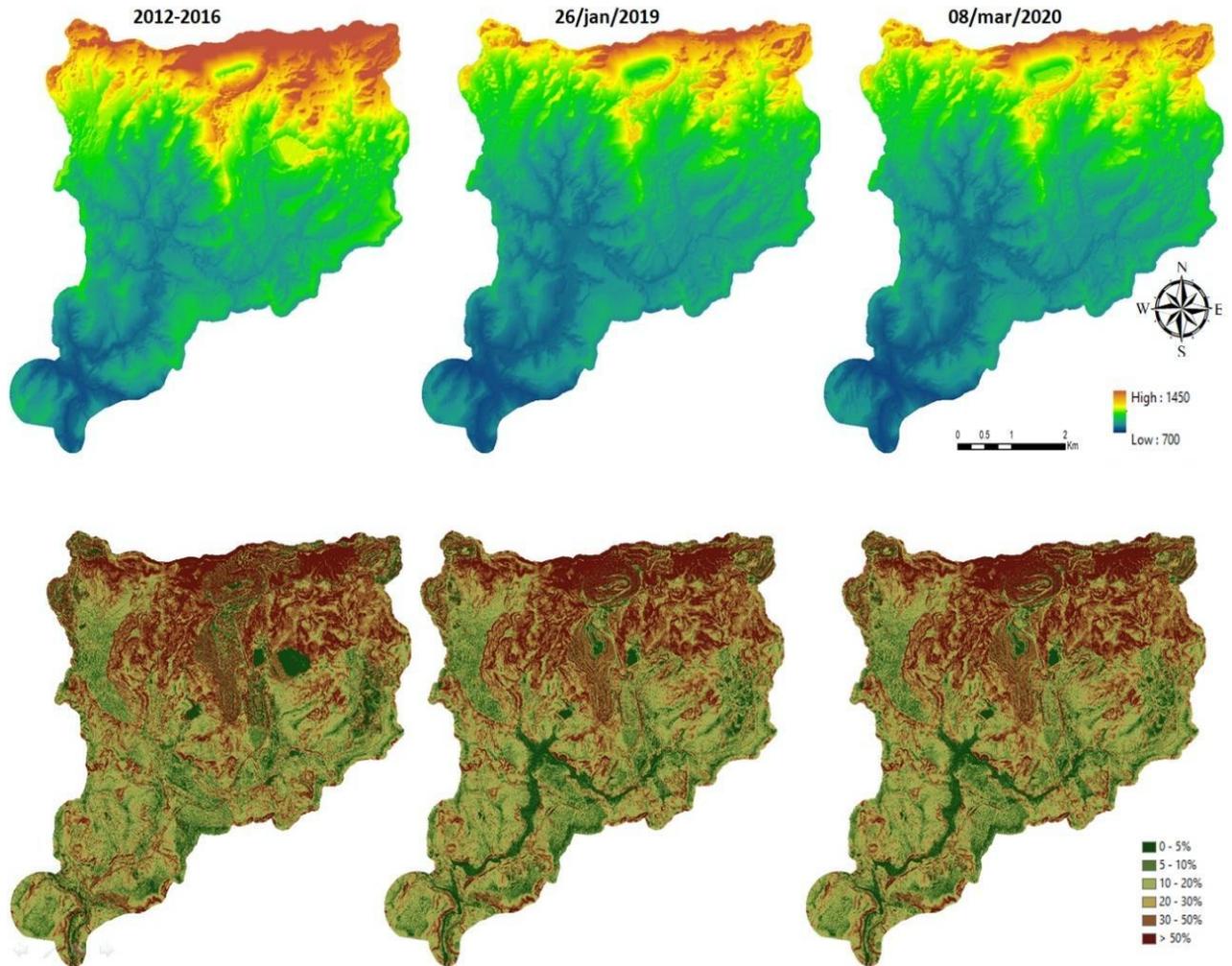


Figura 3 – Modelos digitais de terreno e mapas de declividade da superfície topográfica na área de estudo para as três datas em análise.

As superfícies de declividade possibilitaram ao subprojeto 02 caracterizar as APPS e proveram apoio a interpretação de dados precisos de hidrografia, mais especificamente dos cursos d’água, bem como da precisa caracterização morfológica da superfície topográfica para o perfeito entendimento das áreas de encosta, dos topos de morro e de fundos de vale que apoiaram interpretações e análises dos subprojetos 08 e 60.



3.2. Apoio geodésico⁷

Nesta seção estão descritos os procedimentos destinados para apurar os pontos de apoio posicional levantados em campo e a qualidade das medidas rastreadas com GNSS.

3.2.1. Considerações iniciais sobre as atividades de campo

As atividades nos limites da propriedade da Vale S.A seguiam protocolos de segurança que impactaram a programação pré-estabelecida, a começar pelo deslocamento interno que dependia de um segundo veículo da empresa operando como “batedor”, conduzido por funcionário em toda a extensão da bacia ou localidade. Em segundo lugar, pelo regime de turnos, sendo que matutino iniciava, a depender do que fora acordado a véspera, às 08:00h e se estendia até às 11:30h. Após o almoço seguia a etapa derradeira até às 16:30h, com dilatação nestes limites de tempo a depender da disponibilidade dos agentes e condição climática favorável. Houve, no entanto, flexibilizações nestes turnos de forma a otimizar as operações de levantamento. Nas áreas externas a mineradora, a equipe operou em horários ainda mais flexibilizados, chegando a realizar medições durante o período noturno.

3.2.2. Metodologia do apoio geodésico

O transporte de medidas altimétricas (altitude ortométrica) a partir de referências de nível (RRNN) do IBGE, inicialmente proposto como objeto parcial do levantamento geodésico, foi substituído pelo emprego dos valores de elevação extraídos do MDT proveniente do perfilamento laser contratado pela Vale S.A, e que foi disponibilizado ao CTC com o presente subprojeto em curso.

Para o apoio geodésico foi utilizado um par de receptores GNSS modelo T300 da COMNAV com capacidade de rastrear diferentes constelações de satélites. O equipamento atendeu com propriedade as demandas de registros geodésicos na área do projeto. Considerando o compromisso maior do projeto em garantir qualidade posicional para um mapeamento em escala 1:10.000, os métodos estáticos-rápidos com duração do rastreamento de até 20 min/ponto

⁷ Operação de levantamento no terreno que utiliza de técnicas precisas de medições angulares, lineares e de posicionamento para determinar a posição de pontos na superfície da Terra ou abaixo da mesma, considerando os parâmetros de curvatura da Terra e Referência Geodésica (Datum) para a elaboração de bases cartográficas.



e o levantamento cinemático corrigido em tempo real (RTK) prevaleceram dentre os utilizados no levantamento dos pontos. O desenho metodológico adotado foi amparado na Resolução - PR No. 22, de 21-07-83 publicado pelo IBGE e que trata das Especificações e Normas Gerais para Levantamentos Geodésicos em território brasileiro (<https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101677.pdf>) e pelo o serviço on-line para pós-processamento de dados GNSS, conhecido por profissionais que atuam com topografia, geodésia e demais áreas que necessitam de posicionamento de precisão como Posicionamento por Ponto Preciso (PPP): IBGE-PPP (<https://www.inde.gov.br/pdf/bservico1602.pdf>) detalhado na Tabela 1.

GNSS T300 da COMNAV	
Método de posicionamento	Precisão
Estático	Horizontal: 2.5 mm + 1 ppm RMS
	Vertical: 5 mm + 1 ppm RMS
<i>Real Time Kinematic</i> (RTK)	Horizontal: 10 mm + 0.5 ppm RMS
	Vertical: 20 mm + 0.5 ppm RMS
DGNSS diferencial	Horizontal: 0.25 m + 1 ppm RMS
	Vertical: 0.5 m + 1 ppm RMS
Constelação	Frequência
GPS	L1 C/A, L1/L2 P, L5
BeiDou	B1, B2, B3
GLONASS	L1/L2
Softwares de processamento	
Compass Receiver Utility (CRU) v.1.7.3	Conversão de formato de arquivo original(.cnb) em RINEX(.21O)
Windows Mobile Device Center (WMD) v. 6.1.6965	Comunicação de arquivos entre a coletora e o PC

Tabela 1- Especificações técnicas dos equipamentos e procedimentos do levantamento de campo.



Houve o registro de pontos de apoio geodésicos com os rastreadores de sinais de satélites de duas formas; método RTK e o método estático-rápido⁸, ilustrado pela Figura 4. O primeiro método consistiu na disposição de dois receptores com finalidades distintas. Um dos receptores (base) foi colocado em uma posição estratégica - geralmente, no ponto mais elevado sem obstáculos naturais ou artificiais, na sub-bacia Ferro-Carvão de tal modo que pudesse difundir as correções diferenciais, em tempo real, ao segundo aparelho (volante). O dispositivo volante (rover) foi responsável por capturar as coordenadas posicionais de cada localidade previamente sinalizada ou pontos notáveis; como interseções viárias, cruzamento de calçamentos ou vias férreas. Ao final de cada dia de rastreio, os registros armazenados no receptor base foram enviados ao portal do IBGE e processados pelo que se convencionou tratar por PPP e, conseqüentemente, atualizando e reformando as coordenadas originais no receptor volante.

A segunda estratégia visou agilizar a captura de pontos com os dois receptores similares operando de forma idêntica como volante. Em posições distintas e simultâneas, os equipamentos seguiam fazendo os registros geodésicos. Ao final do qual, tinham o mesmo destino do primeiro método. Obtendo as coordenadas de processamento PPP.

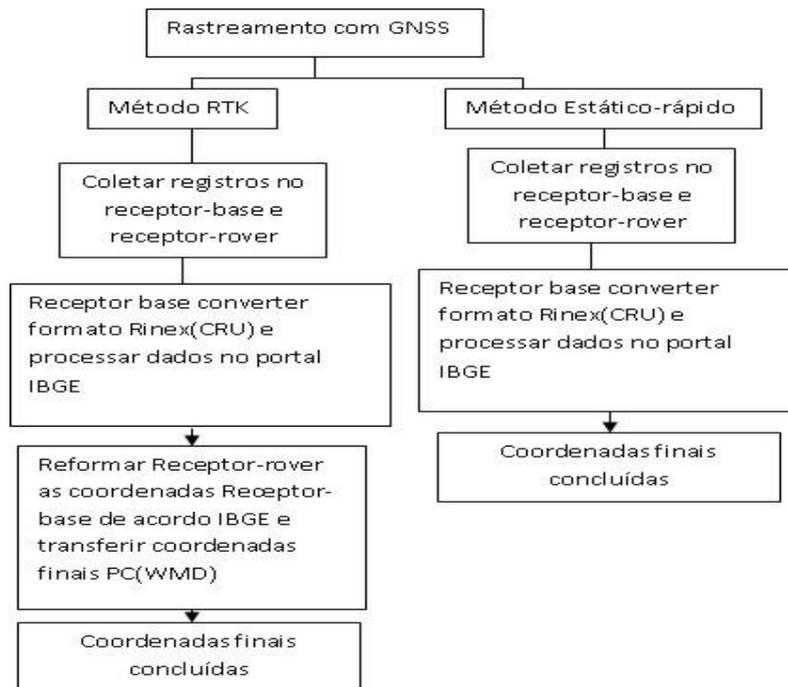


Figura 4 - Fluxograma das etapas metodológicas do levantamento e processamento GNSS adotados no Subprojeto 2.

⁸ Real Time Kinematic, método de levantamento com receptor GNSS onde o cálculo das coordenadas dos pontos medidos ocorre em tempo real. Estático rápido é um método de levantamento com receptor GNSS que depende de pós-processamento para o cálculo das coordenadas dos pontos medidos.



Foram implantados, com registro físico, dois receptores-base com rádio-link, pontos estes descritos detalhadamente nos documentos de Monografia do Marco (exemplificado na seção Material Suplementar), e que enviavam a correção geométrica diferencial em tempo real ao receptor volante, veja Figura 5. Para assegurar uma melhor performance do equipamento rádio-transmissor, os pontos-base foram instalados em locais de topografia elevada e posicionado estrategicamente dentro do raio de ação do sistema. Como exemplo, um dos pontos foi instalado na área elevada próximo ao mirante, termo atribuído pelos funcionários da mineradora. Com isso, o receptor-volante pode ser deslocado para diversas localidades pré-sinalizadas ou pontos notáveis voltado para dois objetivos, garantindo a medição rápida e precisa de diversos pontos na área interna da mineradora.



Figura 5 - Rastreamento com receptor volante em pontos foto identificáveis nas imagens drone.

Além disso, as medições atenderam ao arranjo da coleção de aerofotos colhidas pelo drone e à conferência do posicionamento geográfico das cenas orbitais compatíveis com a escala de 1:10.000. Cabe ressaltar que alguns dos pontos, como o N. 56 e 57 foram levantados externos à área de abrangência da sub-bacia, de forma a promover a melhor distribuição geométrica da rede de pontos. Não obstante, a técnica de rastreamento conhecida como rápido-estático foi estabelecida para contornar eventuais falhas de conexão entre os receptores base e volante, para sobrepor e contornar as limitações de acesso à mineradora por protestos movidos por moradores de Brumadinho, bem como para tornar mais produtiva as atividades de campo. Desta forma, houve o registro geodésico e coleta em 69 pontos na área da mineradora e lindeira à propriedade (Figura 06), incluindo distribuição da precisão de 40 pontos coletados no processo estático-rápido



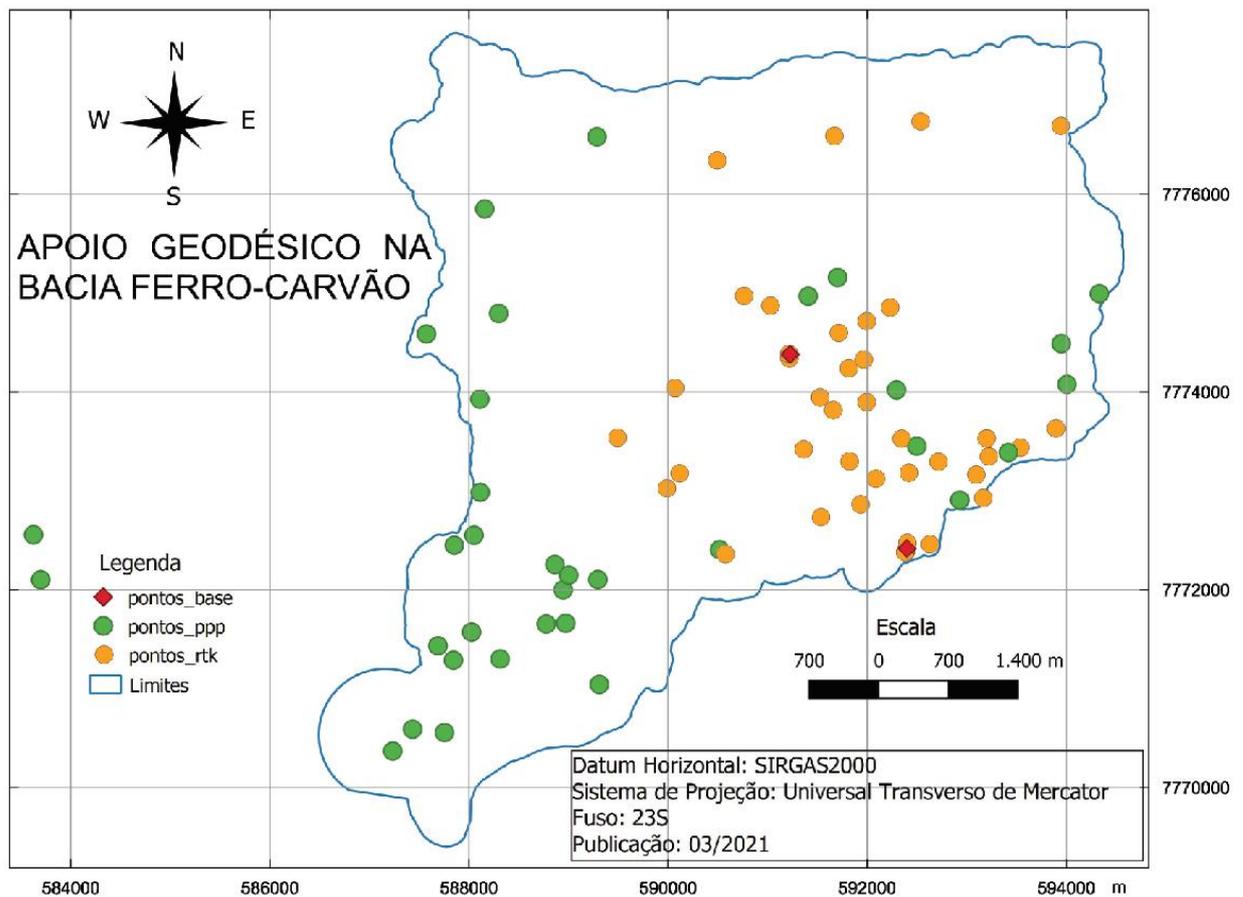


Figura 6 - Mapa da distribuição espacial de pontos de apoio geodésico na sub-bacia Ferro-carvão.

Com 95% de nível de significância a solução alcançou um desvio padrão da precisão horizontal igual a 12,409 cm e da precisão vertical 7,175cm. Os resultados apurados apontam que o Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD) (Tabela 2) é compatível com o apoio para mapas com a escala de 1:1.000, portanto, muito superior ao propósito de atender à base cartográfica 1:10.000. Figura 7 ilustra a um gráfico com as respectivas precisões nas medidas plana e vertical dos pontos levantados em Erro Médio (EM e Erro Padrão (EP).



Tipo	PEC	1:1.000		1:2.000		1:5.000		1:10.000	
		EM	EP	EM	EP	EM	EP	EM	EP
Planimetria	A	0,28	0,17	0,56	0,34	1,40	0,85	2,80	1,70
	B	0,50	0,30	1,00	0,60	2,50	1,50	5,00	3,00
	C	0,80	0,50	1,60	1,00	4,00	2,50	8,00	5,00
	D	1,00	0,60	2,00	1,20	5,00	3,00	10,00	6,00
Altimetria	A	0,27	0,17	0,27	0,17	0,54	0,34	1,35	0,84
	B	0,50	0,33	0,50	0,33	1,00	0,67	2,50	1,67
	C	0,60	0,40	0,60	0,40	1,20	0,80	3,00	2,00
	D	0,75	0,50	0,75	0,50	1,50	1,00	3,75	2,50

Tabela 2 - Especificação Técnica de Controle de Qualidade de Produtos de Conjuntos de Dados Geoespaciais. Fonte: DSG (2016).

Os pontos 1 e 2 são referentes às localidades pertinentes ao registro dos receptores-bases, respectivamente, e as precisões variam de 1 a 5mm. Os demais foram rastreados no método RTK e demanda, em tese, da correção diferencial transmitida pelo receptor-base no momento da captura do ponto.

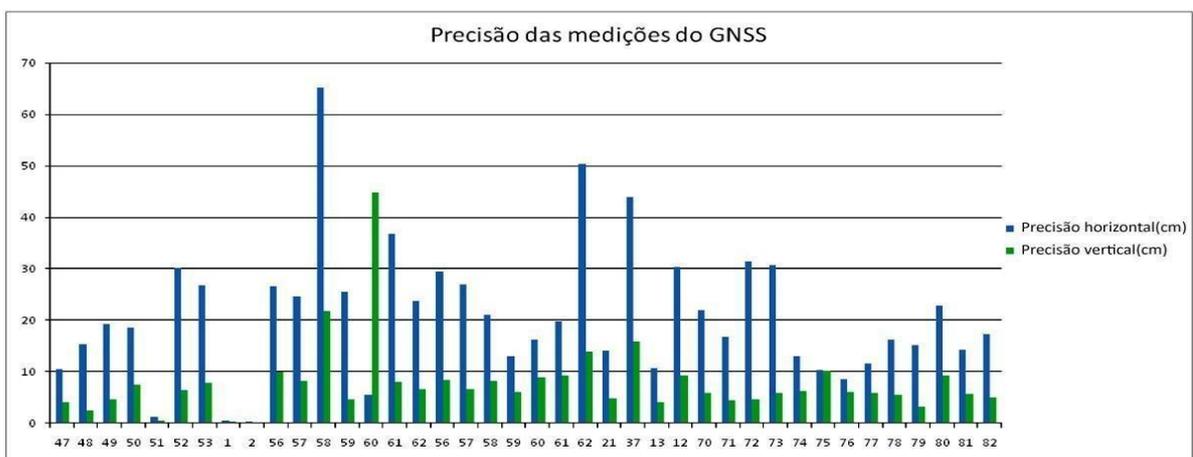


Figura 7 - Precisão dos pontos geodésicos coletados com receptores GNSS.

3.3. Cobertura aérea com drone

A cobertura aérea por drone foi a estratégia adotada pelo Subprojeto 2 para maximizar a coleta de dados em campo. O registro contínuo e em detalhes da superfície na área de estudo possibilitou o alcance da equipe a pontos remotos para medição e/ou interpretação, esta podendo também orientar a equipe pelo contexto espacial em que o ponto ou a feição geográfica se encontra. Contudo, dada a substancial diferença de tempo entre o período T3 (abril de 2020) e as atividades de levantamento em campo (janeiro e fevereiro de 2021), notou-se que o imageamento por drone passou a revelar também o contexto mais atual da cobertura e do uso



do solo na área de estudo, razão pela qual a coordenação do Subprojeto 2 justifica a inclusão dos produtos do levantamento aéreo por drone, tais como o mosaico ortorretificado e o modelo digital de superfície dentre os objetos de entrega.

3.3.1. Material e métodos utilizados no aerolevanteamento

O drone utilizado no levantamento foi o modelo DJI Phantom 4 Pro V2. A câmera de captura de imagens do equipamento possui um sensor de matriz fixa do tipo CCD - *Charge Coupled Device* - com 20 milhões de pixels, sensor CMOS de 1 polegada e obturador mecânico com controle de velocidade, além de sistema de navegação GPS/GLONASS, estabilizador da câmera (*gimbal*) com três eixos (inclinação, rotação, giro), bateria inteligente com duração aproximada de 30 minutos e controle remoto com visão em tempo real.

A campanha ocorreu durante os dias 12, 13 e 14 de janeiro e 4, 5 e 6 de fevereiro e cobriu aproximadamente metade da sub-bacia do ribeirão Ferro-Carvão, em torno de 1500ha do fundo de vale do ribeirão Ferro-Carvão, desde às barragens B-1 e B-VI até o encontro com o rio Paraopeba, correspondendo a área que teve maiores alterações no uso e cobertura do solo devido o rompimento da B-1. A Figura 8 mostra a área coberta pelo mapeamento com drone já ilustrando sobre ela o mosaico ortorretificado.

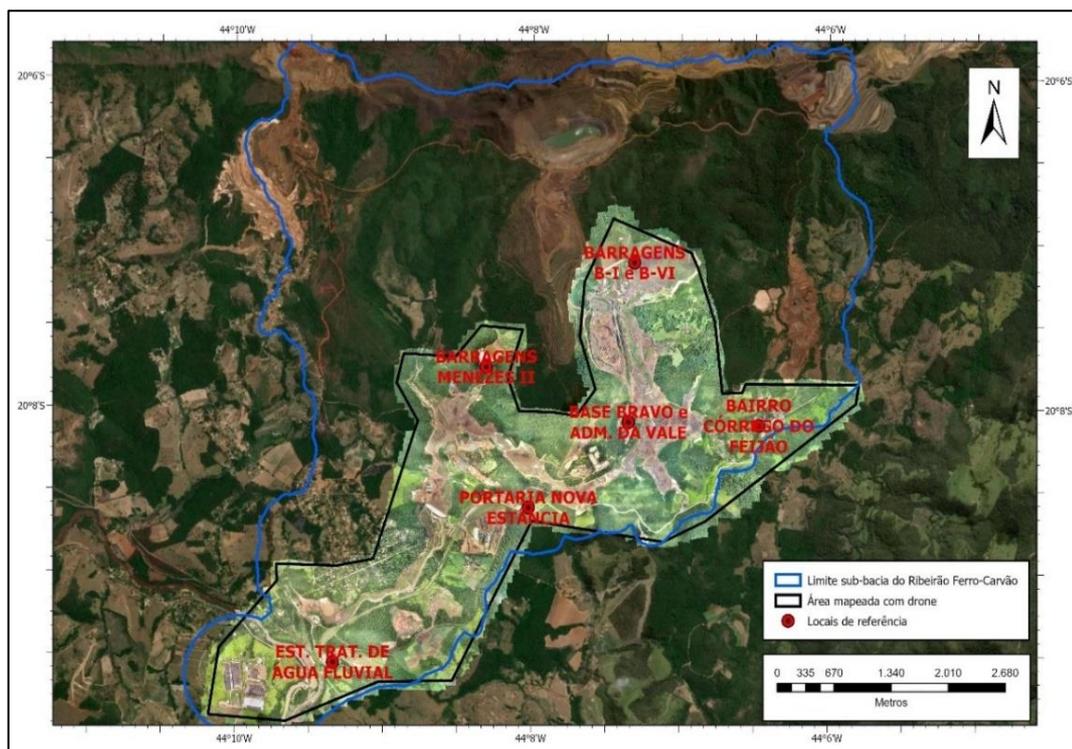


Figura 8 - Área da sub-bacia do Ribeirão Ferro-Carvão mapeada com drone.

Para o desenvolvimento do trabalho foram coletadas 7289 fotografias aéreas com sobreposição longitudinal e lateral de 80% e 75%, respectivamente, e altura média de voo de 120 metros dos pontos de decolagem, podendo alcançar até 200 metros do solo em locais de fundo de vale e de maior declividade. Foram utilizados 29 pontos de controle dentre os contidos na Figura 6, com acurácia centimétrica para aprimorar o georreferenciamento do mapeamento com drone. Em contrapartida, para verificar o posicionamento geográfico, foram utilizados outros 5 pontos de controle, indicando um erro posicional médio abaixo dos 50 centímetros, que é considerado suficiente para atender os objetivos do mapeamento com drone. Os pontos de controle foram sinalizados utilizando cal virgem ou alvos notáveis, como faixas na estrada, passeios, meios-fios, entre outros. As Figuras 9a e 9b ilustram um exemplo de medição de pontos de controle em campo e posterior apontamento em fotos. Exemplo de medição de pontos de controle pré-sinalizados pode ser visto na Figura 5, página 22 do presente relatório.



Figura 9 - Medição de ponto de controle utilizando feição existente no terreno (esquerda) e o correspondente apontamento do ponto de controle fotoidentificado na imagem aérea (direita).

3.3.2. Processamentos e produtos do aerolevanteamento

A alta resolução espacial das imagens do drone permite documentar fielmente o estado mais recente das áreas impactadas e processos de recuperação ambiental, construções civis, maquinários, diferentes tipos de vegetação e solo, entre outros. As Figuras 10a a 10f ilustram o nível de detalhe obtido com o mapeamento e a Figura 11 ilustra as barragens B-I e B-VI (pós-rompimento). Ambos exemplos revelam registros importantes para subsidiar a contextualização e as análises de outros subprojetos.



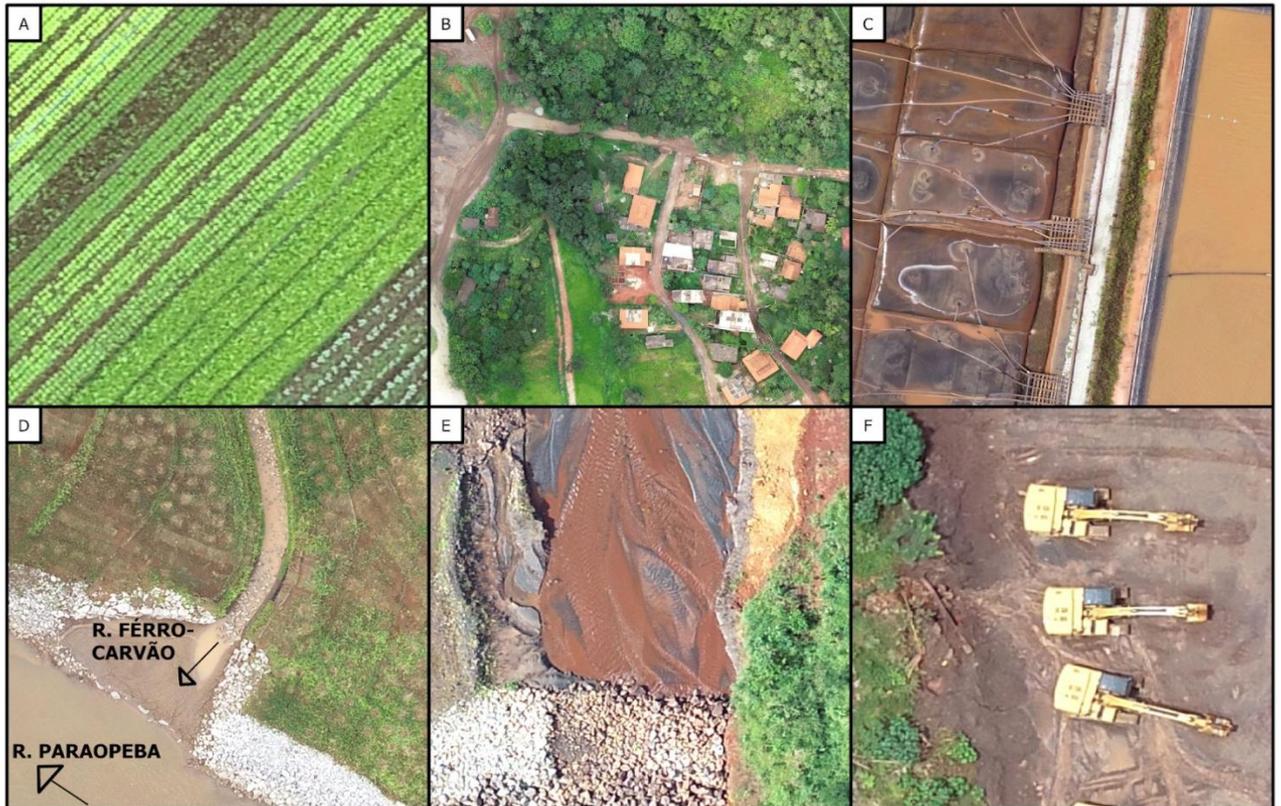


Figura 10 - A: Cultivo de hortaliças. B: Bairro adjacente ao Córrego Ferro-Carvão. C: Etapa de tratamento de água por Bolsa Geotêxtil de Desidratação (Geobags). D: Encontro do Rio Paraopeba e do Ribeirão Ferro-Carvão, área em recuperação ambiental. E: Pequena barragem no leito do Ribeirão Ferro-Carvão e solos com diferentes colorações. F: Maquinário trabalhando em operações de movimentação de terra.



Figura 11- Barragens B-I e B-VI mapeadas pelo voo do drone entre janeiro e fevereiro de 2021.



Em síntese, o processamento da fotogrametria com drone inicia com um algoritmo de reconhecimento de imagens que identifica e descreve pontos correspondentes em conjuntos de imagens aéreas sobrepostas. Em seguida, o algoritmo *Structure-from-motion* utiliza essa informação para simultaneamente calcular a posição e orientação das imagens aéreas e produzir uma nuvem de pontos organizada em um ambiente virtual com estrutura 3D. O próximo passo consiste em produzir uma nuvem de pontos mais densa, ao buscar e identificar as feições que estão na vizinhança dos pontos correspondentes identificados anteriormente nos conjuntos de imagens aéreas. Os pontos são distribuídos sistematicamente pelo sistema e registrados nas fotografias que apresentam maior grau de ortogonalidade na projeção (nadir). O algoritmo faz então a busca desses pontos nas imagens adjacentes (pontos homólogos) através de correlação de imagens, processo computacionalmente exaustivo, porém consagrado na fotogrametria.

A etapa seguinte à produção da nuvem de pontos é a interpolação da mesma para gerar uma malha triangular (ainda em ambiente 3D), que é a base de origem do arquivo matricial 2D (.tiff) do Modelo Digital de Superfície. O MDS apresenta as altitudes de todas as feições sobre a superfície, como vegetação, edifícios, barramentos, etc. Maiores detalhes sobre o do processamento fotogramétrico com drone pode ser consultado em Carrivick et al. (2019), Agisoft LCC (2019), Iglhaut et al. (2019), Remondino et al. (2017), e Westoby et al. (2012).

A Figura 12 ilustra o modelo digital de superfície gerado no mapeamento. Devido a diferença de elevação, é perceptível o percurso do fundo de vale do Ribeirão Ferro-Carvão desde as Barragens B-I e B-VI até o Rio Paraopeba.



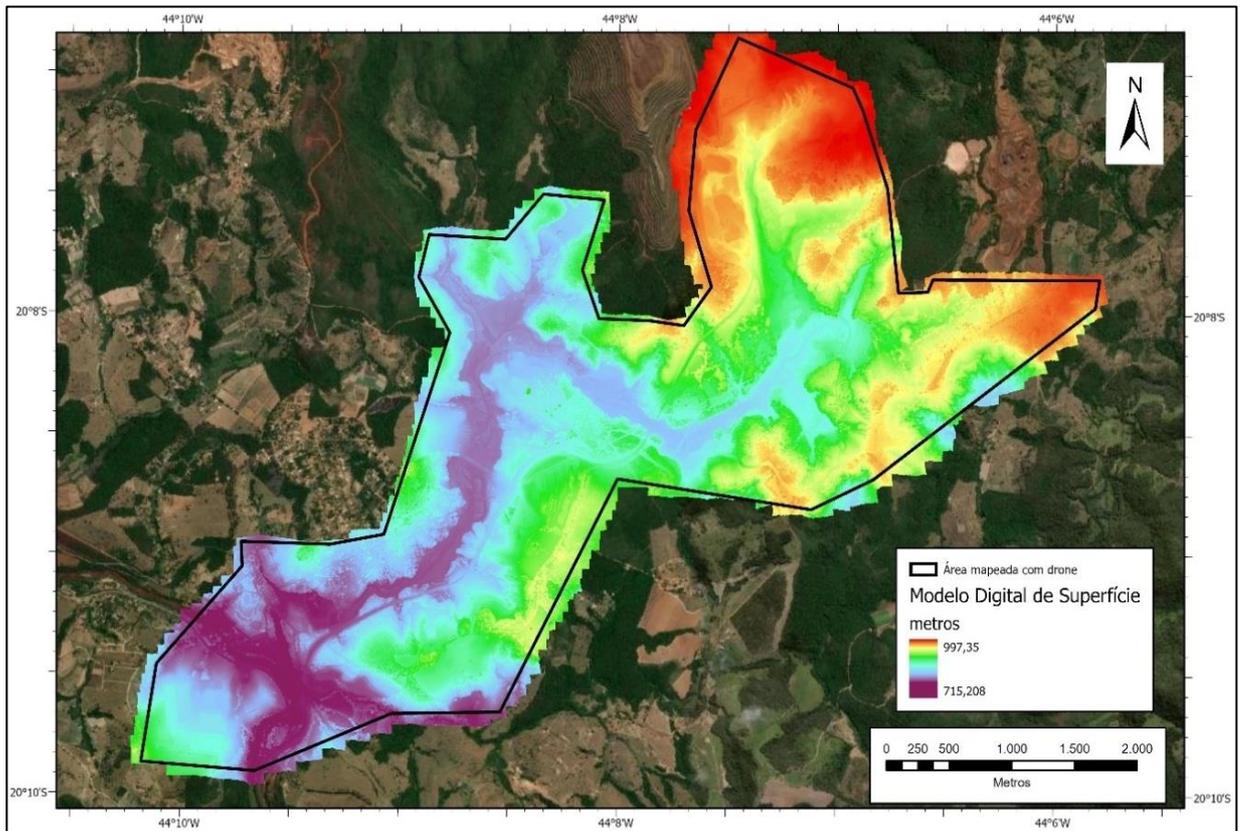


Figura 12 - Modelo digital de superfície derivado do processamento das imagens de cobertura aérea do drone realizado entre janeiro e fevereiro de 2021.

3.4. Controle de qualidade posicional

A presente seção do relatório tem por objetivo apresentar o laudo da avaliação do controle de qualidade posicional da imagem orbital ortorretificada referente ao período T3 (abril de 2020) através de medidas precisas levantadas no apoio geodésico descrito na Seção 2.1 deste relatório. A análise posicional medida com base na imagem T3 serviu como referência para a validação da qualidade posicional das demais imagens (T1 e T2), conforme informado no Relatório Parcial do Subprojeto 02.

3.4.1. Aderência geométrica das imagens T1 e T2 à imagem T3

Foram utilizados 33 pontos devidamente fotoidentificados e medidos nas três imagens em análise. As coordenadas planas Norte e Este⁹ de cada um desses pontos foram tabuladas e

⁹ Referentes ao sistema de projeção cartográfica Universal Transverso de Mercator (UTM), zona 23 Sul, projetadas sobre o referencial SIRGAS-2000



serviram de entrada para computar as métricas de qualidade baseadas no Padrão de Exatidão Cartográfico (PEC) tradicional e digital (PEC-PCD). A Figura 13 ilustra a distribuição de pontos nas três imagens e a Figura 14 ilustra em detalhes a divergência geométrica obtida em dos pontos do conjunto.



Figura 13- Distribuição dos pontos homólogos fotoidentificáveis utilizados no controle de qualidade posicional.



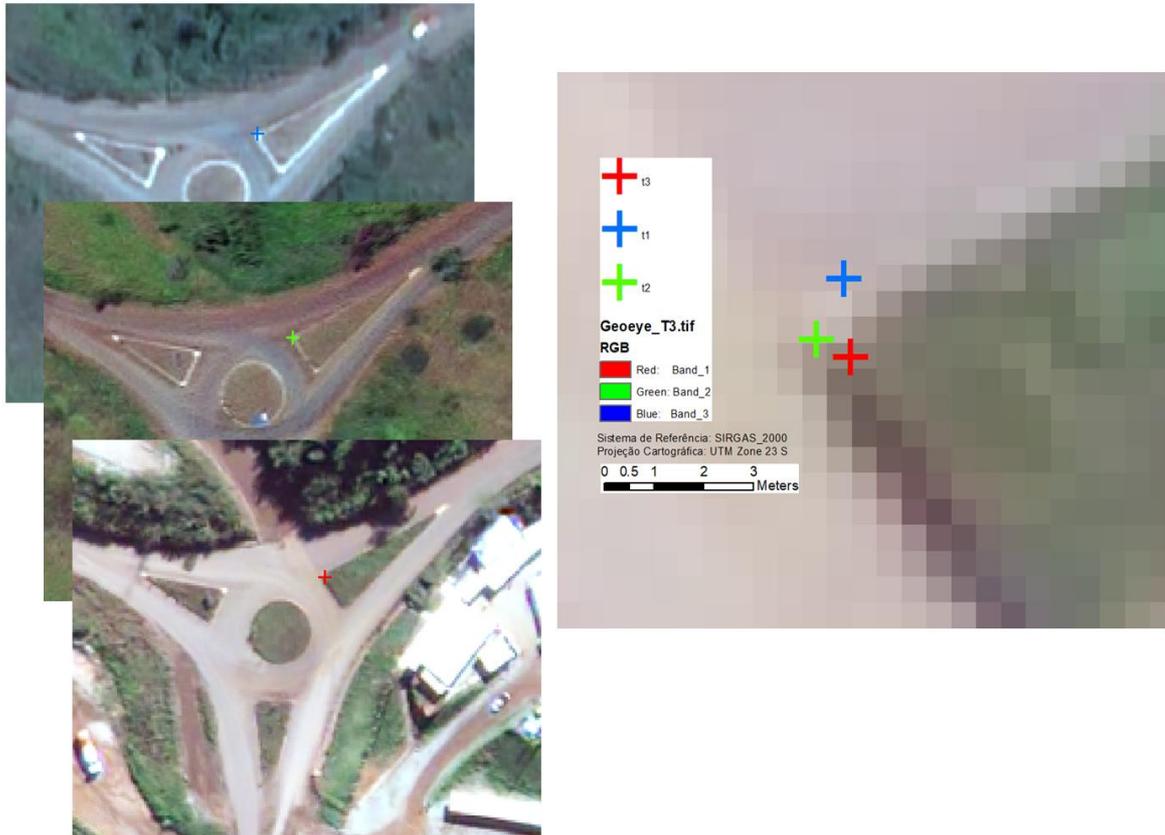


Figura 14 - Exemplo de um dos pontos levantados em campo com receptor GNSS e fotoidentificados nas imagens correspondentes aos três períodos em análise.

Ao considerar fixas as coordenadas dos pontos medidos na imagem T3, analisou-se as métricas de discrepância das medidas derivadas das imagens T1 e T2. A Tabela 3 sintetiza os resultados.

Produto / Sensor	PEC		PEC-PCD	
	Erro Sistemático	Classe A	Erro Sistemático	Classe A
Imagem T1 / Pleiades	Aprovada	Aprovada	Aprovada	Aprovada
Imagem T2 / Geoeye	Aprovada	Aprovada	Aprovada	Aprovada

Tabela 3- Síntese dos resultados da aderência geométrica entre as imagens dos tempos T1 e T2 para com a imagem do tempo T3.

3.4.2. Análise posicional

Considerando que as imagens são ortorretificadas, ou seja, foram geometricamente distorcidas de modo a adequar as limitações impostas pela projeção cônica do sensor orbital para a projeção



ortogonal¹⁰, e que o principal objetivo do estudo é compor uma base cartográfica para análise multitemporal das classes de cobertura e uso do solo, estabeleceu-se como premissa a garantia de que as imagens apresentassem aderência geométrica. Essa análise foi apresentada no relatório anterior. Contudo, cabe ressaltar que o protocolo aqui desenvolvido trata de uma análise relativa da qualidade geométrica das imagens, posto que a análise da qualidade posicional depende de pontos de controle levantados no terreno e que sejam fotoidentificáveis nas imagens em investigação. Esse aspecto é agora considerado no presente relatório.

A metodologia de análise da qualidade posicional pontual posicional da imagem mais recente foi fundamentada em parâmetros atuais do PEC-PECD (Padrão de Exatidão Cartográfico- Padrão de Exatidão Cartográfico Digital, recomendado pela CONCAR, 2011, 2016) e do PEC (Padrão de Exatidão Cartográfico, vide Brasil, 1984, mais tradicional) relatados em Nero et al (2017), Nero (2006), Nero (2005), Nogueira Junior et al (2004). Assim, foram obtidos os seguintes resultados, conforme apresentado na Tabela 4. Na tabela tem-se que pontos de controle coletados por meio de metodologia GNSS com precisão de 1 a 2 cm foram utilizados como sendo a referência mais precisa e sendo comparados com os mesmos pontos de controle extraídos da imagem mais recente (imagem T3), sendo considerada novamente, nessa etapa, a escala 1:10.000.

Os resultados dos pontos medidos na imagem T3 indicaram sua compatibilidade para emprego em cartografia de base de escala 1:10.000, e que o erro posicional encontrado está dentro da tolerância que habilita a imagem para a Classe A, seja com base no PEC como no PEC-PCD. A tabulação com toda a descrição detalhada das análises está apresentada na seção Material Suplementar.

Produto / Sensor	PEC		PEC-PCD	
	Erro	Classe A	Erro Sistemático	Classe A
Imagem T3 / Geoeye	Aprovada	Aprovada	Aprovada	Aprovada

Tabela 4 - Síntese dos resultados da análise da qualidade posicional da imagem T3 tendo como referência os pontos de controle obtidos com GNSS descritos na seção 2.1.

¹⁰ Distorção geométrica nas imagens aéreas e orbitais para padronização da escala cartográfica. A ortogonalidade é a propriedade primária de uma carta topográfica e que a capacita de servir como instrumento referência para medidas de distância, área e volume.

3.5. Controle de qualidade temático

A presente seção do relatório tem por objetivo apresentar as atividades desenvolvidas no tocante a avaliação da qualidade temática do resultado da classificação de imagens pelo método *deep learning* e com a aplicação da análise do índice Kappa.

3.5.1. Materiais e métodos do controle de qualidade temático

No desenvolvimento da parte prática foram utilizados os seguintes recursos:

- Programa de sistema de informação geográfica livre QGIS 3.14.1-Pi e aplicativo AcATaMa;
- Microsoft Excel: utilizado para a tabulação dos dados e cálculo do índice Kappa.
- Bases cartográficas: imagens digitais resultantes da classificação *deep learning* realizada sobre a imagem de satélite mais atual do projeto; ortofoto digital do mapeamento por drone na área mais crítica selecionada e com precisão compatível à escala 1:10.000 e recente (Figura 15).

Quanto ao método, de um modo geral, foi realizada a sobreposição das imagens do local de estudo e da mesma imagem obtida pelo drone, sendo realizada a inspeção individual ponto a ponto. A seguir foi definida a real classificação do elemento pela visualização da imagem de melhor resolução (imagem do drone), sendo assim registrada a real classificação. Após essa inspeção de laboratório e de escritório foi gerada a matriz de confusão (correlação), isso tudo no ambiente do QGIS com o emprego do aplicativo AcATaMa. Posteriormente, o arquivo gerado foi exportado para o excel e gerado ao final o índice Kappa, sendo finalmente realizada a classificação da qualidade temática e conforme descrito com detalhe nos itens a seguir.



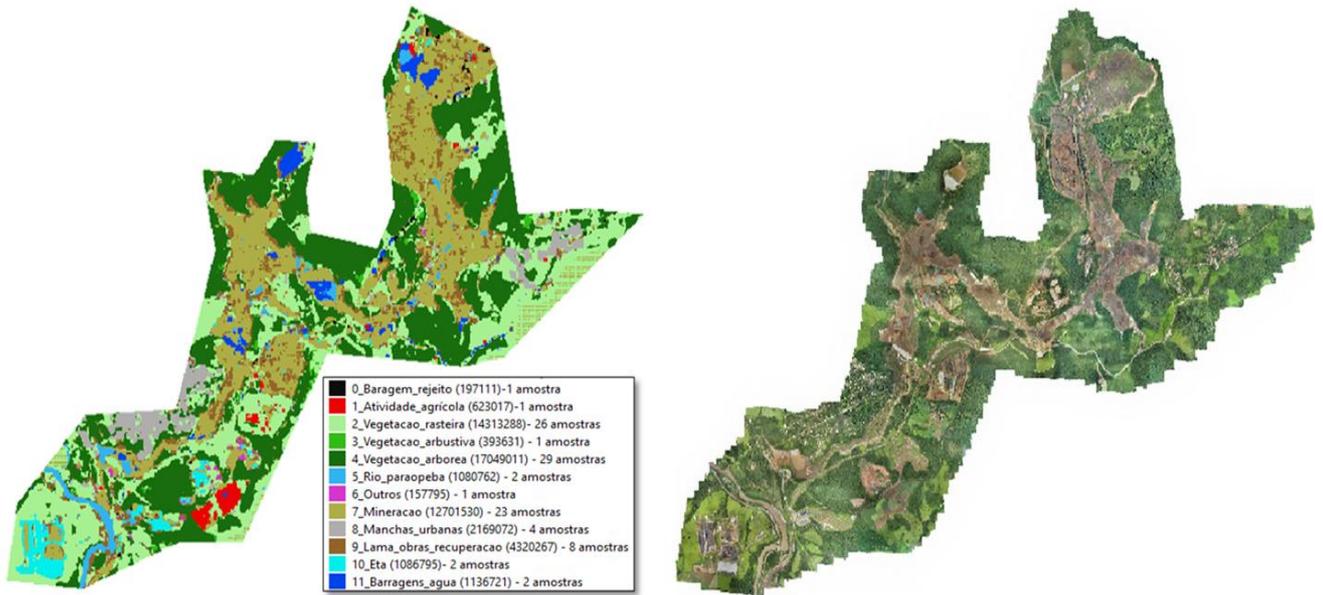


Figura 15 - Recorte da classificação realizada via qualidade temática do resultado da classificação de imagens pelo método do deep learning (esquerda) e ortofoto produzida a partir do imageamento por drone pela equipe da UFMG (direita).

3.5.2. Processamento dos dados para a qualidade temática

Como procedimento base de análise da qualidade temática foram adotados 100 pontos de amostra estratificada proporcional à área de estudo. A Tabela 5 apresenta as 12 classes de cobertura do solo presentes na área de estudo no período T3, bom como o total de elementos que foram amostrados

Classe	Tamanho da amostra (n)
0_Barragem_rejeito	1
1_Atividade_agricola	1
2_Vegetacao_rasteira	26
3_Vegetacao_arbustiva	1
4_Vegetacao_arborea	29
5_Rio_paraopeba	2
6_Outros	1
7_Mineracao	23
8_Mancha_urbana	4
9_Lama_obras_recuperacao	8
10_ETA	2
11_Barragem_agua	2
Total	100

Tabela 5 - Classes de cobertura do solo presentes em T3 e os respectivos tamanhos amostrais proporcionais à área.

Posteriormente, foi realizada a validação da classificação desses 100 pontos amostrais de modo a se analisar cada um destes pontos individualmente. Para tanto, foi utilizado o módulo



AcATaMa, o qual é um aplicativo complementar ao programa QGIS, ilustrados na Figura 16 (visão geral do ambiente) e Figura 17 (análise de um ponto amostral).

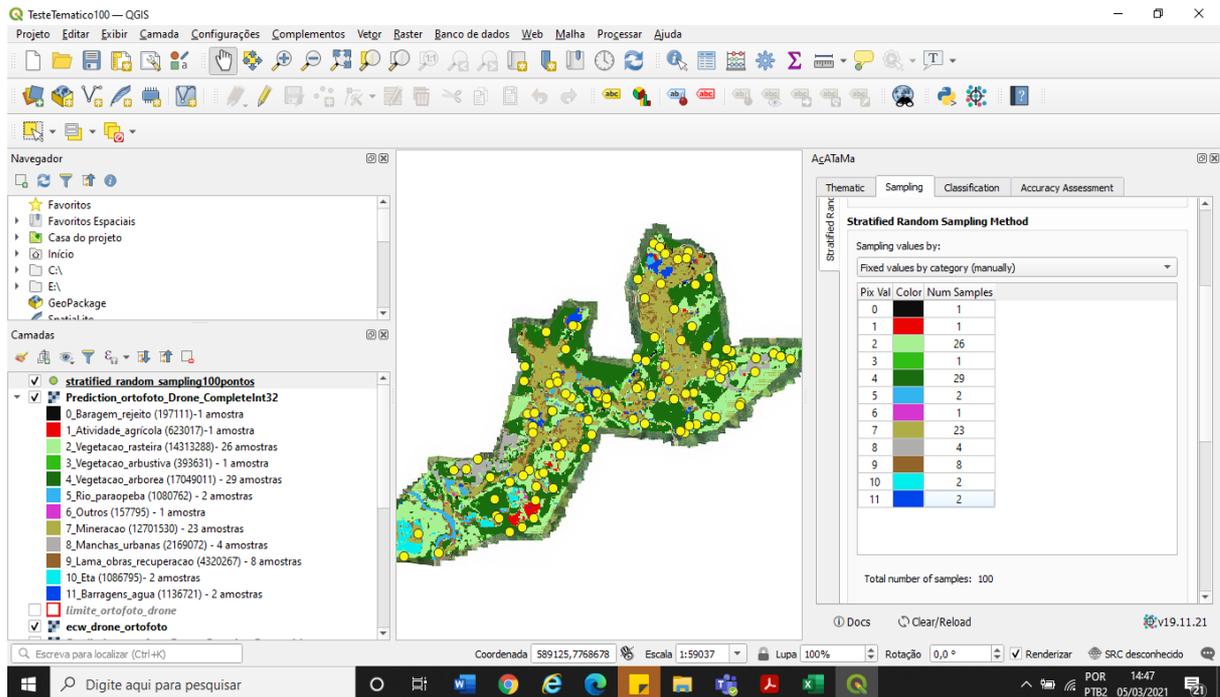


Figura 16 - Ambiente de análise de qualidade temática no módulo AcATaMa em ambiente QGIS.



Figura 17 - Exemplo de análise de um ponto amostral no processo de classificação temática.

Ao finalizar a amostragem dos 100 pontos foi gerada a matriz de confusão no ambiente do programa, onde de onde se extraem os resultados da análise. Para tanto, foi utilizado o módulo AcATaMa e exportado o arquivo para o formato MS Excel, sendo então este trabalhado e gerada a análise, conforme observado na Tabela 6.



Classes temáticas	0 (0_0_Barag	1 (1_Ativ	2 (2_Ve	3 (3_V	4 (4_Ve	5 (5_Ri	6 (6_O	7 (7_Min	8 (8_M	9 (9_Lam	10 (10	11 (11_	Total	Acurácia do Usuário
0 (0_0_Baragem_rejeito)	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1,0000
1 (1_Atividade_agricola)	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1,0000
2 (2_Vegetacao_rasteira)	0	0	16	2	7	0	0	0	1	0	0	0	26	0,6154
3 (3_Vegetacao_arbustiva)	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1,0000
4 (4_Vegetacao_arborea)	0	0	0	0	29	0	0	0	0	0	0	0	29	1,0000
5 (5_Rio_paraopeba)	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	2	0,0000
6 (6_Outros)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0,0000
7 (7_Mineraçao)	0	0	0	0	0	0	0	22	0	1	0	0	23	0,9565
8 (8_Manchas_urbana)	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	4	1,0000
9 (9_Lama_obras_recuperacao)	0	0	1	0	1	0	0	0	0	5	0	1	8	0,6250
10 (10_Eta)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	2	0,5000
11 (11_Barragens_agua)	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0,5000
total	1	1	18	3	38	0	0	23	5	9	1	2	100	

Tabela 6 - Matriz de confusão resultante

Por fim, foi realizado o cálculo do índice *kappa* (k) por meio da formulação apresentada na equação (1), a seguir:

$$k = (Pc - Pi) / (Pc - 1) \quad (1)$$

Onde:

k = índice *kappa*;

Pc (2) = percentual corretamente classificado (soma dos elementos da diagonal principal (Pci) dividido pelo tamanho da amostra (n)); Pi (3) = total classificado da classe (Pci) vezes total da amostra da classe (ni) dividido pelo total amostral ao quadrado (n²):

$$Pc = \sum Pci/n \quad (2)$$

$$Pi = \sum (Pci*ni) / n^2 \quad (3)$$

Considerando-se as equações supracitadas foram obtidos os seguintes resultados:

$$Pc = 0,810 \text{ e } Pi = 0,220, \text{ obtendo-se o valor de } k = 0,756$$

Desta forma, ao considerar as escalas de índice *kappa* que foram apresentadas e estudadas recentemente por Foody (2020), a qual considera os conceitos e as escalas de classificação do índice *kappa* apresentadas por Fleiss et al (1969), Lands e Kock (1977) e Monserud e Leemans (1992), sintetizados na Figura 18, tem-se:



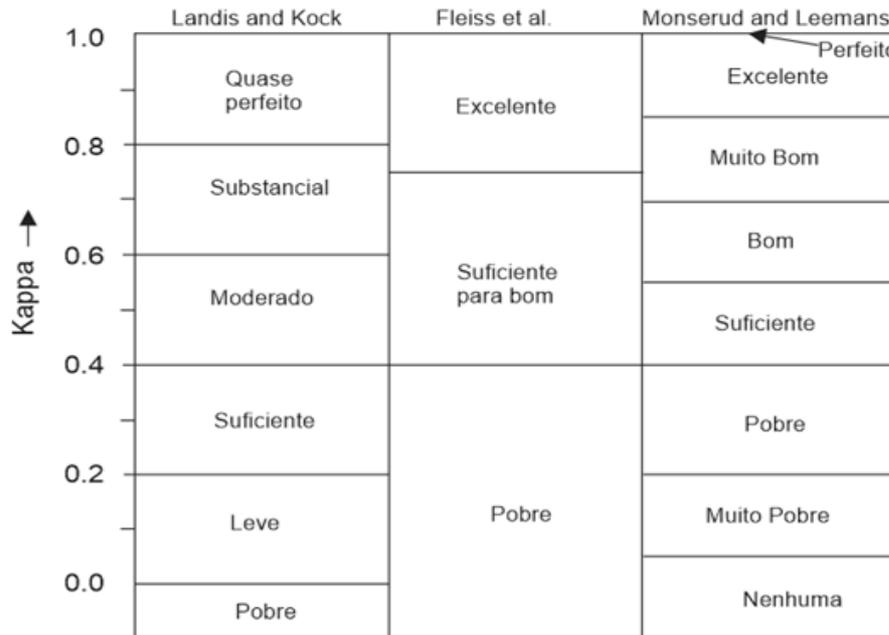


Figura 18 - Classificação do índice kappa segundo autores consagrados e abordada por Foody (2020).

Ao analisar o valor do índice $kappa = 0,756$ é possível afirmar que o resultado apresenta qualidade substancial segundo a escala de qualidade de Lands e Kock (1977), excelente segundo a escala de Fleiss et al (1969) e muito boa segundo a escala de Monserud e Leemans (1992). Além disso, dentro do que foi considerado nas exigências do edital, levou-se em conta a escala de qualidade de Congalton e Green (1999) apresentada na Tabela 7, segundo a qual o índice $kappa = 0,756$ obtido aponta para mapeamento temático de concordância muito boa, convergindo com os resultados obtidos supracitados.

Valor do Kappa	Concordância
$K \leq 0$	Péssimo
$0,0 < K \leq 0,2$	Ruim
$0,2 < K \leq 0,4$	Razoável
$0,4 < K \leq 0,6$	Bom
$0,6 < K \leq 0,8$	Muito Bom
$0,8 < K < 1,0$	Excelente



Tabela 7- Classificação do índice kappa segundo autores consagrados e abordada por Congalton e Green (1999).

Em suma, considerando-se o emprego da metodologia aqui aplicada conclui-se que:

- O emprego de drones e a geração de imagens de melhor resolução podem reduzir consideravelmente os trabalhos de campo e resolve o problema do acesso às áreas inacessíveis na maioria dos casos;
- No emprego dessa metodologia é de fundamental importância a participação na equipe de profissionais com amplo conhecimento e experiência em termos de interpretação de imagens. Isso foi fundamental na definição da correta classificação de todos os elementos da amostra, embora a interpretação e a veracidade dos elementos do mundo real se tornem muito mais viáveis até para leigos. No entanto, deve-se considerar a generalização cartográfica e a experiência em termos de classificação de imagens no modo tradicional;
- A aplicação do método de classificação de imagens pela metodologia do *deep learning* se mostrou eficaz e perfeitamente exequível;
- O emprego de programas de uso aberto demonstrou nessa aplicação a sua viabilidade.

Por fim, pode-se afirmar que a metodologia atendeu as expectativas e as necessidades do projeto.

4. Mapeamento de uso e cobertura do solo

Esta seção do presente relatório expõe os resultados do mapeamento das classes de uso e de cobertura do solo na sub-bacia do ribeirão Ferro-Carvão e áreas adjacentes onde atualmente se encontram as estações de tratamento de água à jusante do ribeirão Casa Branca e na margem oposta do rio Paraopeba à jusante no ribeirão Ferro-Carvão. Os procedimentos iniciais realizados foram de caráter qualitativo no que tange a interpretação e identificação das classes de cobertura do solo, os quais muniram o algoritmo de classificação utilizado para analisar e



rotular os pixels das imagens de acordo com os padrões computados para as classes identificadas manualmente no treinamento do modelo, conforme reportado no Relatório Parcial de dez/2020, seção 4, página 13-18.

Nesta seção estão apresentados os processos de análise semântica que culminaram no mapeamento das classes de uso do solo, por sua vez dependentes da interpretação contextual das feições geográficas identificadas pelos analistas. Para a realização da fotointerpretação e vetorização das classes, foram analisadas as imagens orbitais das três datas definidas, e na análise foi constatado que nem todas as classes apresentadas na proposta do projeto e no edital se faziam presentes na área de estudo, bem como havia a presença de classes não planejadas, o que levou à proposição de pequenos ajustes no escopo metodológico.

Cabe também ressaltar que devido ao longo intervalo de tempo entre a dada de aquisição da terceira imagem (abril de 2020) e o trabalho de campo (janeiro/fevereiro de 2021), muitas das informações contidas na imagem T3 estavam parcialmente desatualizadas. Assim, os trabalhos de campo, em especial as observações realizadas e o imageamento por drone foram fundamentais para a interpretação de algumas feições identificadas nas imagens e permitiu a elaboração de um mapa atualizado. Contudo, é importante frisar que algumas classes de cobertura do solo, como por exemplo, a classe “Lama” constante no tempo 2, chamado de T2 (logo após o rompimento), vem sendo trabalhado diariamente pela Vale e concomitante a isso, suas dimensões geográficas são constantemente alteradas.

Por fim, nesta seção são também apresentados os resultados do mapeamento das Áreas de Proteção Ambiental (APP) desenvolvidas com base nos dados referentes ao período que antecede o rompimento da barragem, e a representação das áreas de Reserva Legal advindas do Cadastro Ambiental Rural (CAR) dos imóveis rurais da área de estudo. A quantificação das classes de cobertura e de uso do solo por período, quantificação das APPS e as respectivas tabulações dessas métricas será apresentada e analisada na seção 4 deste relatório.

4.1. Contextualização das classes

Para início dos trabalhos, foi escolhida a imagem de data mais recente (T3), o que já adiantaria a verificação para a fotointerpretação de T3. A Tabela 8 foi o ponto de partida para a seleção das classes que iriam ser analisadas para as três datas.



TEMAS	COBERTURA DA TERRA	USO DA TERRA	ANÁLISE CONTEXTUAL
AMBIENTAL			- Áreas de Reserva Legal
			- Áreas de Preservação Permanente – APP's (topo de morro, encosta, hidrografia)
			- Métricas da paisagem
VEGETAÇÃO	- Vegetação densa	- Floresta estacional semidecidual	
	- Vegetação arbustiva	- Cerrado - Vegetação degradada	
	- Vegetação rasteira	- Campo sujo - Campos de altitude	
SOLO	- Solo exposto	- Espalhamento da lama de rejeito	
ÁGUA	- Espelho d'água	- Barragem de água (mineração) - Açudes/tanques	
INFRAESTRUTURA	- Manchas urbanas/povoado	- Manchas Urbanas/Povoado - Estrada de asfalto	
	- Imóveis/infraestrutura rural	- Unidade Rural - Vias não pavimentadas - Galpões - Áreas de Cultivo - Pastagem - Pastagem degradada - Estrada de terra - Caminho	
	- Extrativismo Mineral (cava e atividades correlatas)	- Mineração - Estrutura da barragem de Rejeitos – B1 ¹¹ - Barragem de rejeitos - Escritórios e sede social - Áreas de manutenção de equipamentos (da Vale e empresas contratadas) - Ferrovia	
INFRAESTRUTURA DE TRATAMENTO	- Estação de Tratamento de Resíduos Sólidos - ETRS	- Estação de Tratamento de Resíduos Sólidos - ETRS	
	- Espalhamento da lama e trabalhos de recuperação do fundo do vale ¹²	- Lama - Obras de Recuperação	
	- Estação de Tratamento de Águas Fluviais – ETAF 1 e 2	- Estação de Tratamento de Águas Fluviais - ETAF	

Tabela 8- Análise das classes e cobertura e uso do solo para a bacia do córrego Ferro-Carvão.

¹¹ Em T1, representada antes do rompimento. Em T2 e T3, representada somente o que restou da estrutura original.

¹² Apesar de ser colocado aqui como Infraestrutura de tratamento, pode também ser tratado como tema Solo.



Os temas aqui tratados como “Ambientais”, não estão inseridos nem como classes de cobertura ou uso da terra, pois são classes que demandam algum trabalho de processamento das imagens do MDT para serem confeccionadas. Estes trabalhos seguiram metodologias já consagradas e seguem parâmetros estabelecidos pela Lei 12.651/2012 (Art. 61-A) que estabelece que nas APPs é autorizado a continuidade das atividades agrossilvipastoris, de ecoturismo e de turismo rural em áreas rurais consolidadas até 22 de julho de 2008

4.2. Vetorização das feições

O processo de identificação das classes e vetorização das feições iniciou pela imagem T3, no intuito de compatibilizar a base de dados para o levantamento da verdade de campo. Cabe aqui ressaltar que devido à natureza dinâmica da cobertura e do uso do solo (premissa principal que justifica a necessidade do presente subprojeto), e do processo de fotointerpretação, à medida que o trabalho se desenvolve, novas classes puderam ser incorporadas ao rol de classes previamente planejadas, ao passo que outras classes tiveram que ser agregadas. Este fato ocorre, pois, muitas áreas que seriam importantes para a análise do espaço, podem desaparecer dentro do contexto da escala final do trabalho. A imagem T3 foi a escolhida para a ida ao campo, pois era a que apresentava uma realidade mais próxima do que iria se encontrar. Esta temporalidade acompanha o raciocínio deste relatório, onde após a análise de T3, segue-se para T2 e posteriormente para T1, antes do rompimento da barragem de rejeitos de B1, pertencente à companhia Vale.

Desta forma, iniciou-se o processo de vetorização das classes temáticas para T3. Nesta classificação visual foram utilizados os preceitos de leitura e fotointerpretação já clássicos na literatura e citados por SOARES FILHO (2000) e FLORENZANO (2011). É importante ressaltar que a composição colorida das imagens explorou combinações reais (RBG) e falsa-cor combinando a banda infravermelho próximo para facilitar a interpretação da vegetação e corpos d’água. As feições geográficas foram definidas visualmente através de suas características quanto a:

- Tonalidade/Cor: tons de cinza e facilidade de discriminar as cores presentes na imagem;
- Textura: impressão de rugosidade da superfície;
- Tamanho: relacionado com a escala. Aqui, optou-se por agregar algumas classes de modo que elas possam ter relevância na escala final do trabalho;



- Forma: define a natureza dos objetos, se são naturais ou antrópicos;
- Sombra: pode ajudar ou mascarar feições. No caso, em muitas áreas pôde-se perceber a altura dos objetos pelas sombras deles e distingui-los de outros;
- Padrão: extremamente importante para a identificação de determinadas classes, tais como áreas urbanas, com padrões retilíneos cruzados (como num tabuleiro de xadrez) ou mesmo áreas agrícolas;
- Localização: leva em consideração onde o objeto está localizado. Sua posição topográfica ou região.
- Contexto: utilizado na agregação de feições que sozinhos, não fariam sentido na interpretação, como foi o caso da classe “Unidade Rural” ou mesmo para a junção de classes para o mapeamento de cobertura da terra.

Estes mesmos preceitos foram utilizados para as imagens de T2 e T1, tentando uniformizar a interpretação/vetorização destas classes. É importante ressaltar que na chave de interpretação¹³ utilizada (apresentada na seção Material Suplementar), o termo “Cobertura” é utilizado como sinônimo de elementos do meio físico, infraestrutura rural, urbana, extrativismo mineral, etc. Já a coluna “Feição” é tida como as feições não lineares que foram interpretadas, seguidas de uma coluna com as cores (RGB) utilizadas e sugeridas para este mapeamento. Na coluna seguinte, segue-se um ou mais exemplos do que foi visualizado na imagem como esta feição e, na última coluna, uma descrição sobre cada uma destas feições em termos de forma coloração na imagem, sombra, tonalidade, textura, contexto, etc. Já para o mapeamento da “Cobertura e Uso do Solo”, a chave de interpretação contém colunas similares, porém apresentando na tabela a junção de algumas classes dentre as que foram descritas no Edital da Chamada 02.

Para garantir a identificação das feições e a qualidade e suas características geométricas para uma cartografia em escala 1:10.000, fixou-se a escala de visualização entre 1:2.500 (1mm no mapa = 2,5m no terreno) e 1:5.000 (1mm no mapa = 5m no terreno). Essa estratégia permitiu um grande detalhamento dos limites das classes de uso criadas, bem como dos ajustes nas shapes de fronteira para depois readequá-las à escala de 1:10.000 (1mm no mapa = 10m no

¹³ O termo chave de interpretação corresponde a uma base de dados que contém elementos para descrever a interpretação da classe de cobertura /uso do solo considerada.



terreno), limpando ou agrupando-se feições muito pequenas que não teriam importância cartográfica para esta escala, como pode ser observado na Figura 19.

Em geoprocessamento, toda feição mapeada pelo processo de vetorização em plataformas como ArcGIS ou QGIS, sejam eles pontos, linhas ou polígonos fechados (aqui correspondente classes temáticas) possui uma tabela de atributos a ele associada, onde pode-se formatar características tais como perímetro, área, posição, ou qualquer outro atributo categórico ou quantitativo. As informações consultadas dessa tabela são utilizadas para cálculos e análises diversos, como por exemplo as áreas de intersecção ou deduções entre diferentes feições ou entre mapas de diferentes períodos, ou as métricas de paisagem.

A finalização do trabalho com T3, se deu através de ajuste das linhas e nós dos polígonos, de modo a que não se deixasse espaços vazios entre as classes ou outras inconsistências geométricas (espaços entre as shapes digitalizadas), o que poderia prejudicar a aferição das métricas das paisagens.



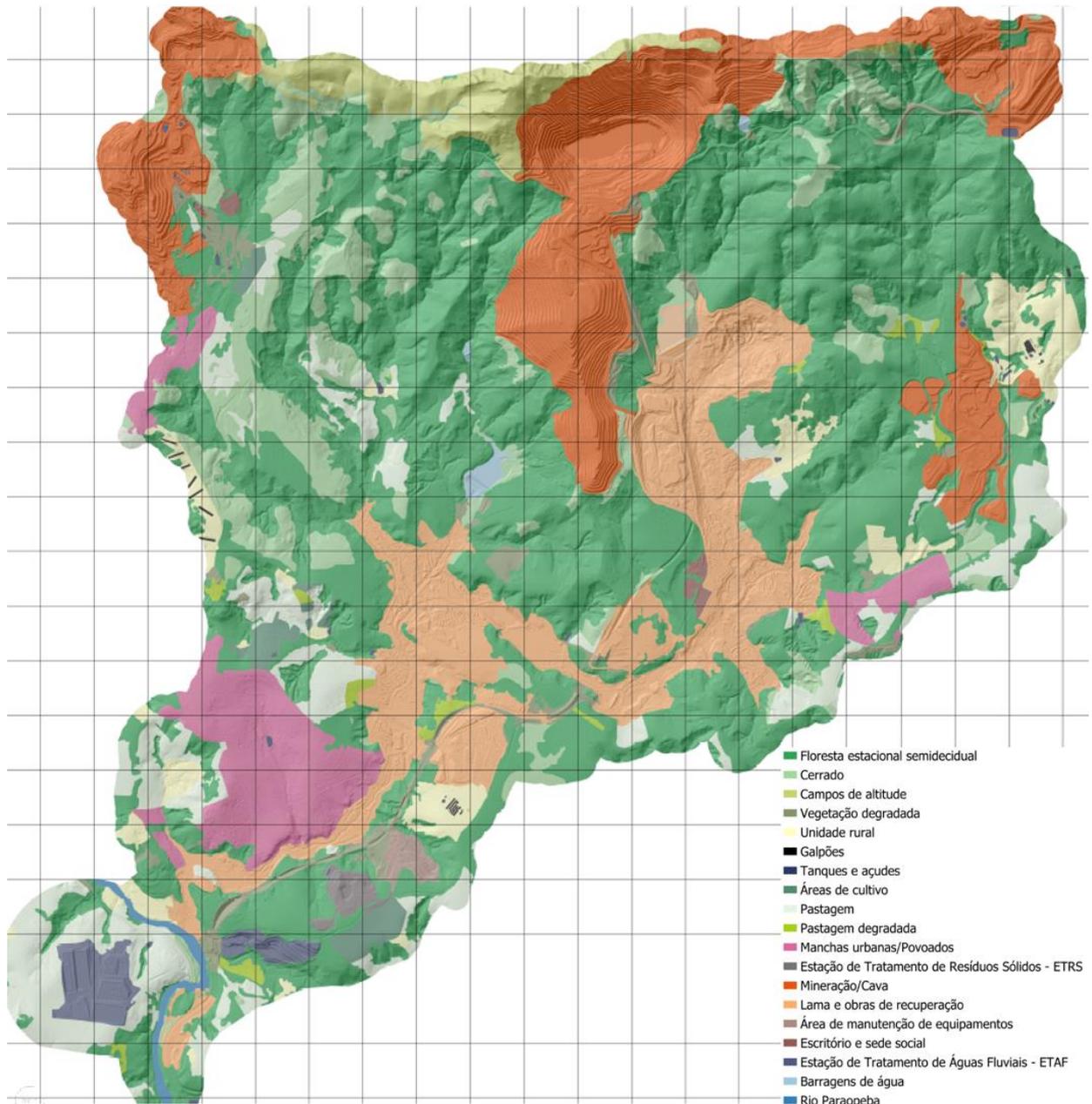


Figura 19- Ilustração de base do mapa de uso e ocupação do solo para T3 – data mais recente.

Após este passo, as imagens correspondentes aos períodos T2 e T1 foram também interpretadas e vetorizadas da mesma maneira e utilizando os mesmos padrões seguidos para a identificação de classes de uso da terra. Esclarece-se aqui que houve alterações em algumas classes, principalmente nas áreas de fundo de vale onde se deu o derramamento da lama devido ao rompimento da barragem B1 da companhia Vale, como pode ser observado na Figura 20. Cabe ressaltar que os mapas apresentados nesta seção do relatório são meras ilustrações dos trabalhos realizados, e que os mapas finais estão apresentados na seção Materiais Suplementares.

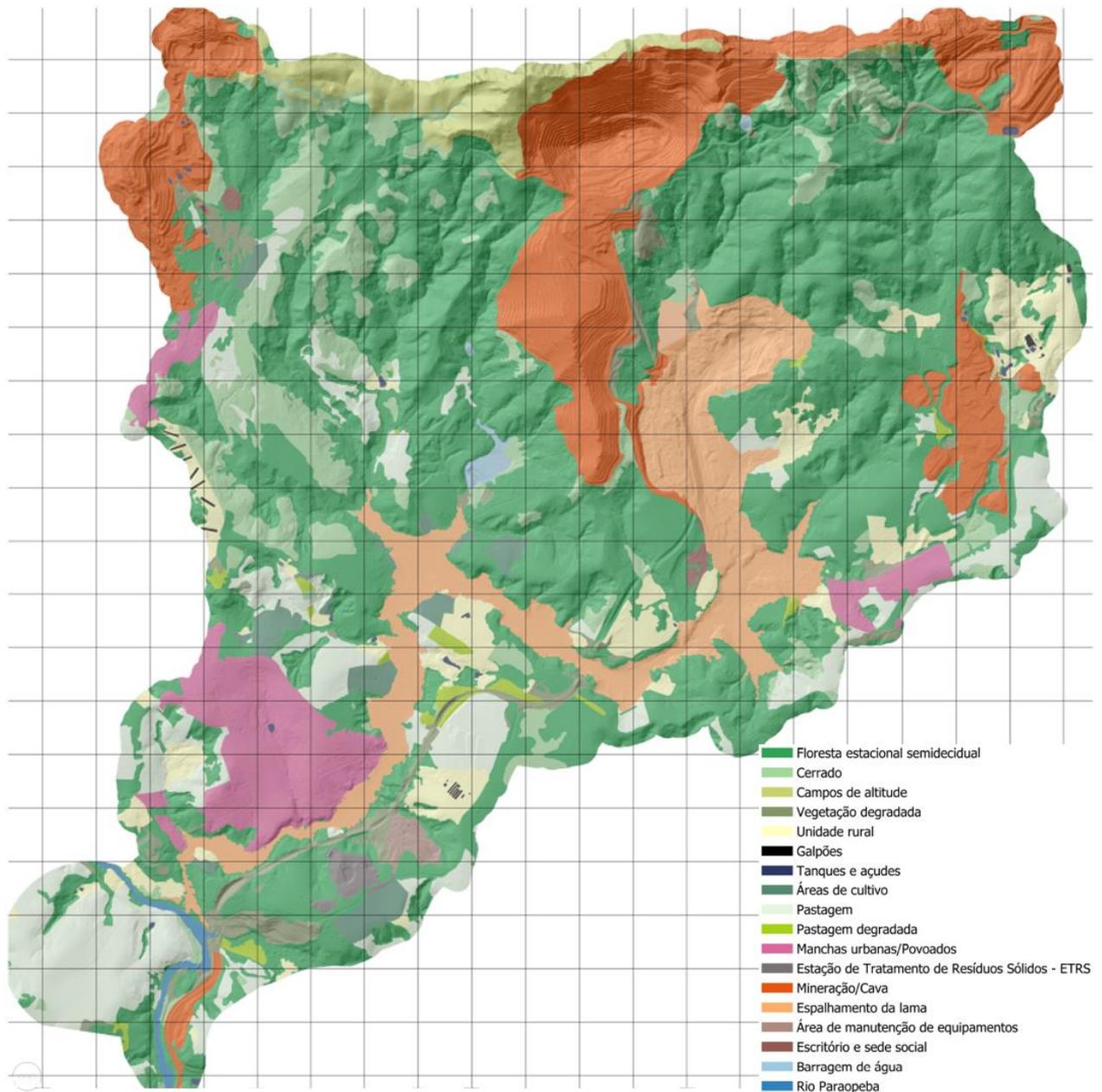


Figura 20 - Ilustração de base do mapa de uso e ocupação do solo para T2 (29/01/2019).

Quando se compara a interpretação de T2 e T3, fica claro que a classe “Lama”, contida em T2 ocupa uma área menor que a classe “Lama + Obras de Recuperação” contida em T3. Dado o significativo intervalo de tempo entre ambas imagens, e as observações levantadas em campo pela equipe, pode-se notar que muitas das áreas adjacentes à várzea do ribeirão Córrego do Feijão passaram a servir como depósito de rejeito de lama, fruto de um processo delicado composto pela remoção da lama espalhada, deposição da mesma de forma organizada em áreas até então não impactadas, seguida da vistoria pelos bombeiros do material depositado na expectativa de detectar vítimas da tragédia. Como conferido nos trabalhos de campo



supracitados, a companhia Vale adquiriu vários imóveis rurais, urbanos, pousadas, etc. que estavam próximos ao derramamento de lama (T2) e muitos deles foram utilizados para ajudar nas obras de recuperação do fundo do vale do ribeirão Ferro-Carvão, como pode ser observado na Figura 21.

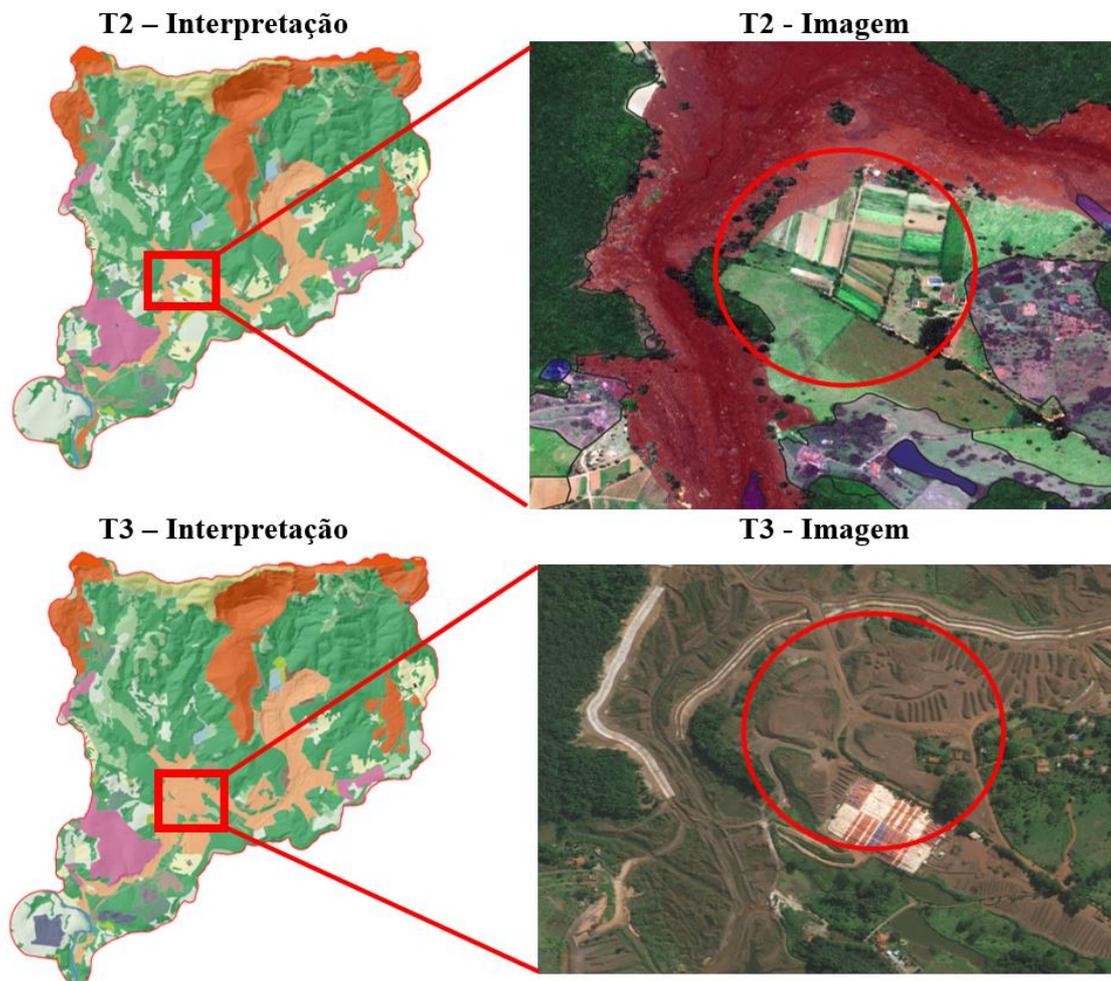
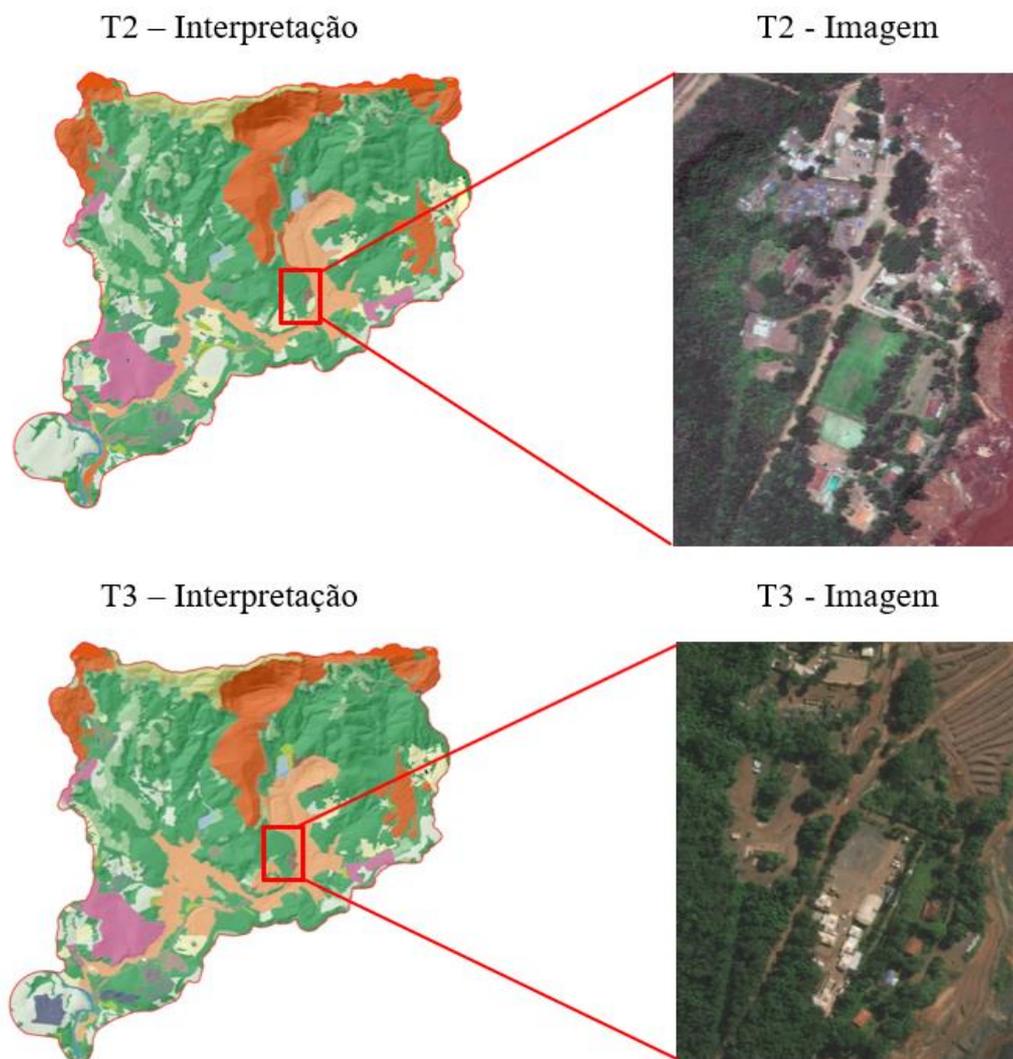


Figura 21- Áreas não atingidas pelo fluxo de lama decorrente do rompimento da barragem B1 e que passaram a servir de área de depósito para dar suporte ao processo de vistoria da lama de rejeito e de recuperação do fundo de vale do córrego Ferro-Carvão.

Um outro aspecto que fica claro em T2 é que a lama praticamente dividiu a bacia em duas porções. Uma delas, acima da margem direita do córrego Ferro-Carvão, onde fica a maior parte da mancha de vegetação (arbórea e arbustiva), a maior mancha urbana e as minerações e, a margem esquerda, onde além do distrito de Ferro-Carvão e grande parte dos cultivos, estradas de acesso. Este “corte” na bacia realizado pelo derramamento de lama, além de prejudicar grande parte das atividades agrícolas na bacia, também ocasionou uma necessidade de alteração em muitas das vias de acesso no interior dela, fato esse que será tratado mais à frente.



A Figura 22 retrata um exemplo do que ocorreu com no fundo do vale em áreas próximas ao derramamento da lama antes e depois do início da vistoria da lama de rejeito e das obras de recuperação. Observa-se na área a existência de sítios, unidades rurais e pousadas, que foram transformadas em “sedes” administrativas, parques de estacionamento, restaurantes, etc. O campo de futebol representado na figura no período T2 pertencente a uma pousada foi pavimentado e atualmente ali se encontra a base operacional dos bombeiros que fazem as buscas pelas vítimas da tragédia. Outras instalações como estacionamentos, banheiros, *containers* refrigerados (visto em trabalho de campo), etc. ocupam atualmente a área.



*Figura 22 - Áreas não atingidas pelo fluxo de lama decorrente do rompimento da barragem B1 e que depois foram adquiridas pela Vale para dar suporte ao processo de recuperação do fundo de vale do córrego Ferro-Carvão. Para este caso, uma antiga área de pousada e de unidade rural foi transformada em estacionamento, banheiros, *containers* refrigerados (visto em trabalho de campo).*

A interpretação e vetorização das classes para T1 (15 e 23/12/2018) seguiu os mesmos parâmetros técnicos seguidos para as outras áreas. Nesta imagem pode-se observar a bacia do



córrego Ferro-Carvão em um período anterior ao rompimento da barragem B1 da companhia Vale (Figura 23). Cabe ressaltar que os mapas de uso e ocupação do solo apresentados nesta seção do relatório, embora munidos da simbologia cartográfica apresentada nos produtos finais, são meras ilustrações dos trabalhos realizados. Os respectivos mapas inseridos no contexto da folha cartográfica estão também apresentados na Seção 9 – Material Suplementar.

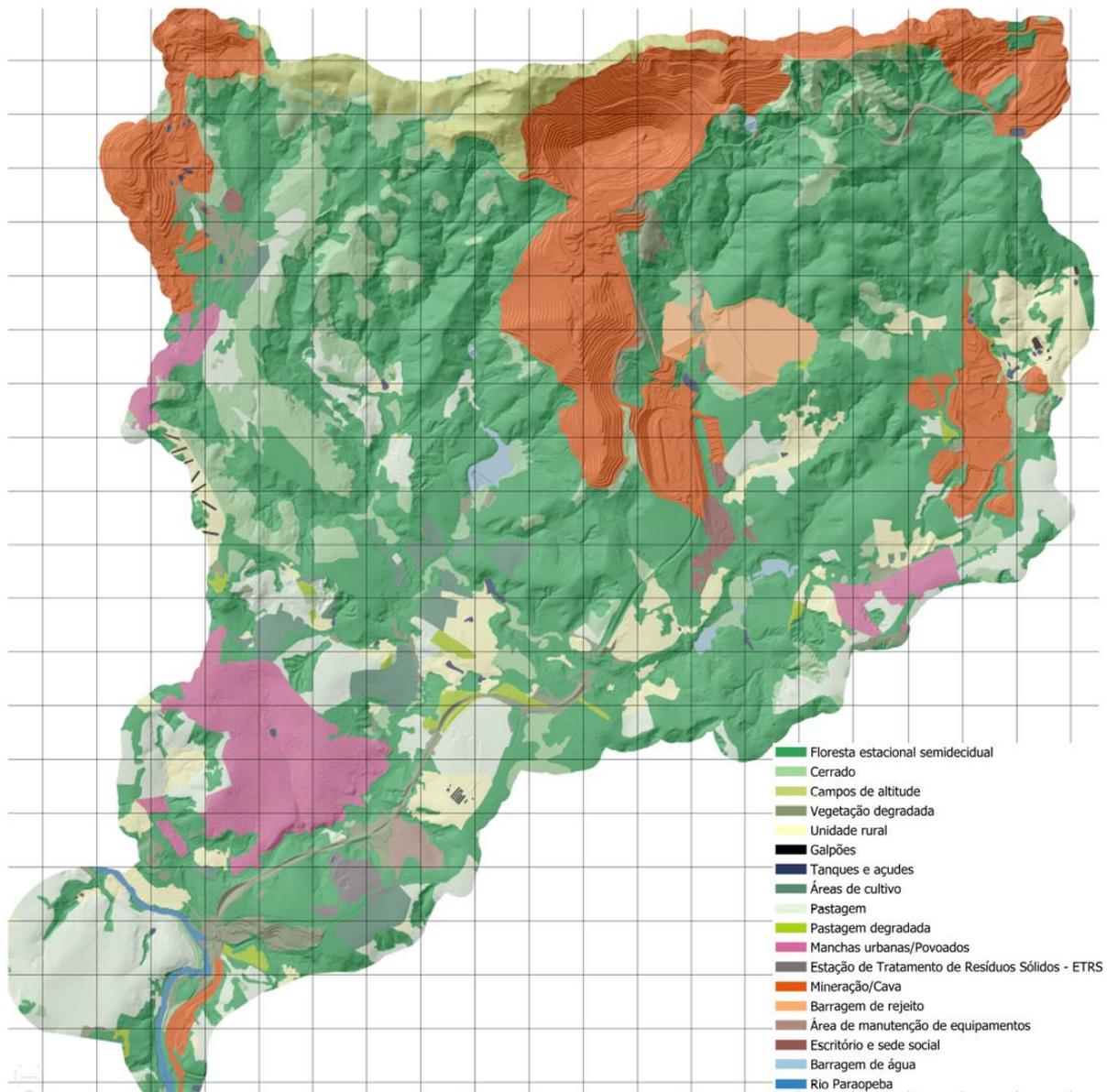


Figura 23- Uso e ocupação do solo para T1 (15 e 23/12/2018).

Na imagem referente ao período T1 pode-se observar a presença das estruturas que foram destruídas total ou parcialmente pela lama decorrente do rompimento da barragem B1. Talvez as mais significantes delas e que talvez tenha gerado mais vítimas tenham sido a destruição



completa dos escritórios e sede social da companhia Vale e que se encontravam a jusante da barragem B1, uma grande pousada limítrofe a este complexo e uma pousada localizada à jusante do ribeirão Ferro-Carvão, como mostrado em perspectiva na Figura 24 (acima), enquanto a perspectiva abaixo ilustra estas mesmas três áreas no período T2, onde pode se perceber a destruição da infraestrutura de escritórios e sede social da Vale e da pousada.

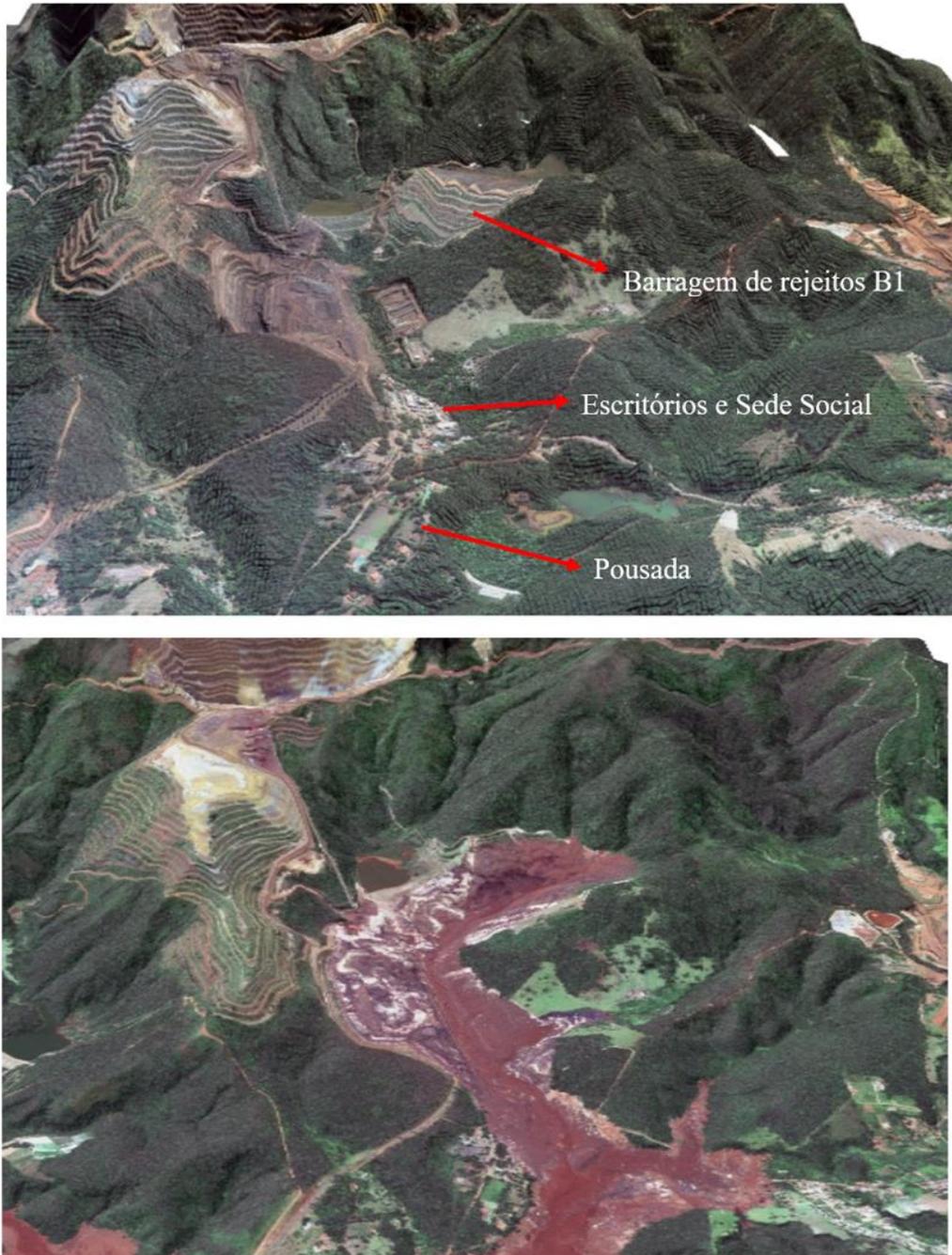


Figura 24- Perspectiva tridimensional da imagem Pleiades referente ao período T1 indicando a localização da barragem B1, da infraestrutura dos escritórios e sede social da companhia Vale e de uma pousada próxima. Ilustração com exagero vertical de 3x (acima) e perspectiva tridimensional da mesma área ilustrada pela imagem GeoEye de 29/01/2019 (T2) três dias após o rompimento da barragem de rejeitos B1 (abaixo).



A Figura 25 mostra o impacto apresentado pelo rompimento de B1 sobre um empreendimento agrícola (horticultura), afetando de forma direta quase 50% da área, esta localizada mais a jusante da área representada na figura anterior.

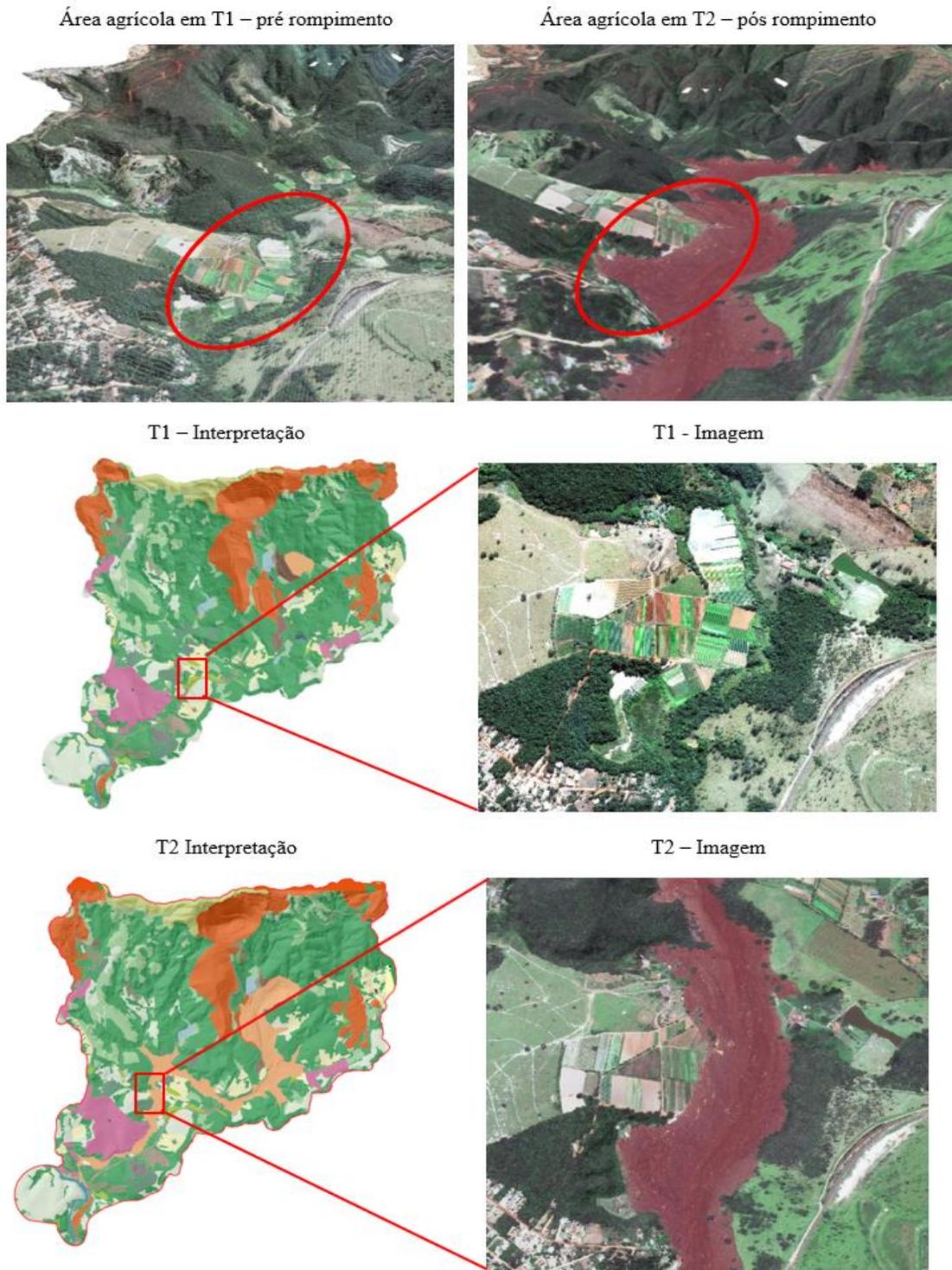


Figura 25- Na parte superior as representações em perspectiva da área agrícola afetada antes e após o rompimento da barragem B1. No centro, a área agrícola em detalhe e sua representação no mapa de uso e cobertura do solo no período T1, e abaixo a área parcialmente tomada pela lama e sua representação no mapa no período T2.



Vale aqui ressaltar que as atividades econômicas (lavouras, pousadas, etc.) que estavam localizadas próximo ao fundo do vale foram afetadas direta ou indiretamente pelo fluxo de lama ou pelo processo de recuperação do fundo do vale. De forma geral, as áreas mais afetadas pelo rompimento foram as porções referentes às atividades agropastoris, sendo quase inexistentes nos dias atuais. O mapeamento da cobertura e uso do solo relatado nesta seção subsidiou a tabulação e métricas como por exemplo a área ocupada por cada classe em cada um dos três períodos, o que permitiu calcular as transições entre as classes e quantificar suas respectivas perdas e ganhos (Seção 5 - Tabulações e Análises).

4.3. Infraestrutura viária

A extração da infraestrutura viária foi realizada por digitalização manual, utilizando uma escala de visualização variando entre 1:2.500 e 1:5.000 de forma a garantir qualidade e representatividade das feições para a cartografia 1:10.000. O procedimento foi realizado na íntegra na plataforma QGIS.

Durante os três períodos em análise houve também significativa alteração da rede viária dentro da sub-bacia. Antes do rompimento da barragem B1, pode-se observar pela Figura 26 que o vale era relativamente bem servido por infraestrutura viária, incluindo trechos de asfalto, estradas sem pavimento, caminhos e uma ferrovia que servia para o carregamento de minério extraído da mina.



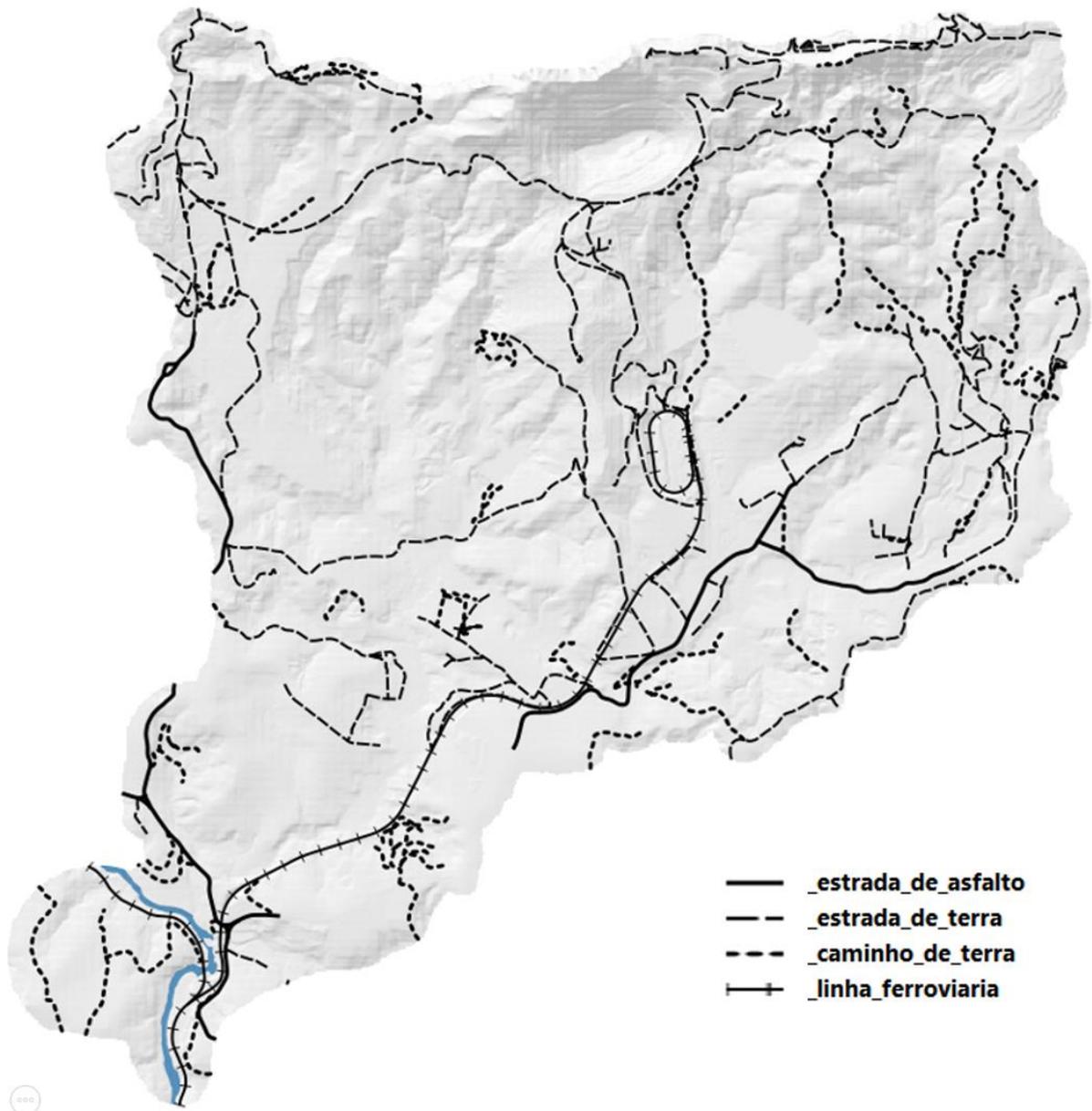


Figura 26- Representação da infraestrutura viária na bacia do córrego Ferro-Carvão antes do rompimento de B1, ilustrada com sombreamento do modelo digital de terreno.

Entretanto, com o rompimento de B1, houve o comprometimento de parte dessa infraestrutura, interrompendo o fluxo de veículos e trens pelo fluxo de lama e isolando algumas localidades e, em um primeiro momento dificultando inclusive medidas de apoio e resgate, como pode ser observado na Figura 27. Nesta figura, as áreas circundadas em vermelho mostram as principais interrupções da infraestrutura. Nelas se destacam toda a destruição da área de descarregamento da mineradora (A), em B a destruição da ponte da ferrovia que passava sobre o fundo de vale, em C, parte da infraestrutura das estradas de terra, bem como de parte dos cultivos agrícolas existentes e em D, as estradas de asfalto que faziam a ligação com a comunidade de Córrego



do Feijão. Na sequência, a Figura 28 ilustra estas 4 áreas em perspectiva tridimensional para melhor visualização.

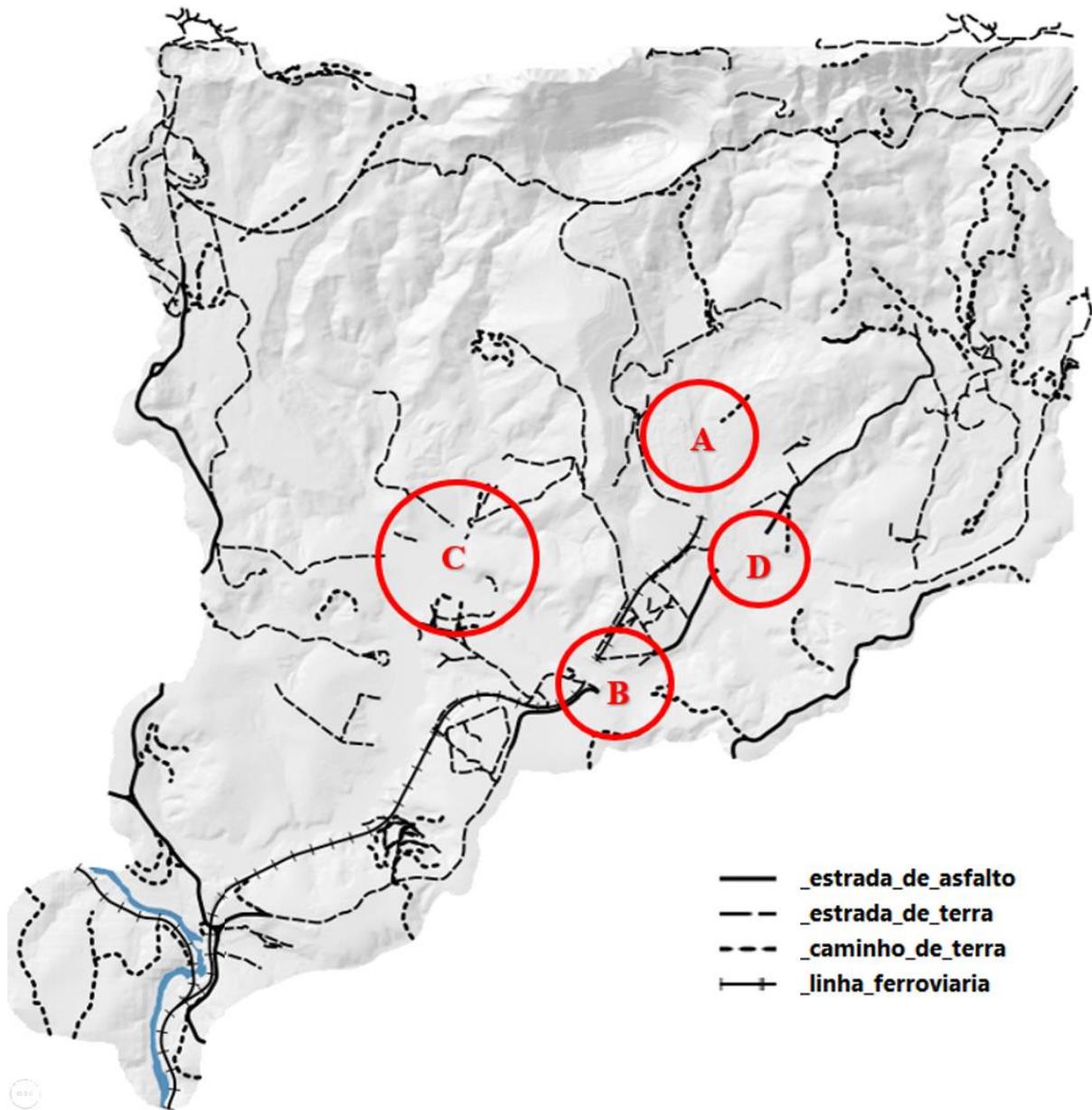


Figura 27- Representação da infraestrutura viária na bacia do córrego Ferro-Carvão interrompida pela ação da lama de rejeitos após o rompimento da barragem B1, ilustrada com sombreamento do modelo digital de terreno.



T1 – situação em 15 de dezembro de 2018



T2 – situação em 29 de janeiro de 2019



Figura 28- Representação em perspectiva das áreas onde ocorreram as principais interrupções da infraestrutura indicadas na Figura 27.

Por sua vez, na imagem referente ao período T3 é possível notar uma grande mobilização para reconfigurar a infraestrutura viária na sub-bacia (Figura 29). Neste sentido, foram criados elos alternativos aos segmentos interrompidos, bem como foram construídos novos segmentos para viabilizar a operacionalização logística dentro e nas proximidades da área afetada. Uma das principais alterações foi a conversão do segmento de ferrovia que levava à área de carregamento



da mina em uma larga estrada de terra, amplamente utilizada para circulação de veículos de pequeno e grande porte na região.

Contudo, há de se compreender que essas transformações na infraestrutura viária ainda estão em andamento, como observado nos trabalhos de campo. Essas transformações incluem o alargamento de estradas de terra e em alguns casos o asfaltamento, como é o caso da estrada que leva à vila Córrego do Feijão, que também onde hoje se encontra a portaria principal da área da mina.

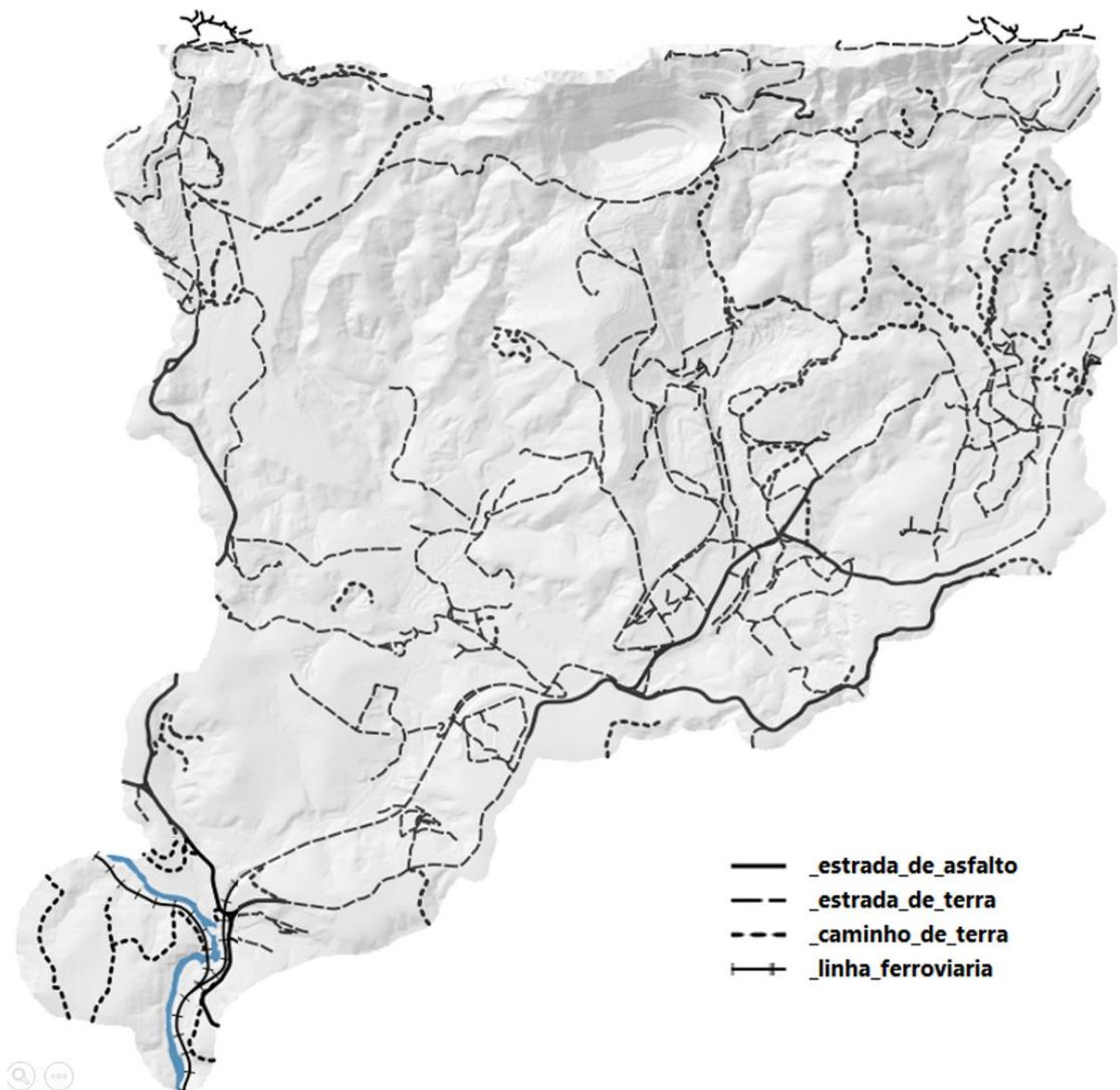


Figura 29 - Reestruturação da malha viária para a bacia do córrego Ferro-Carvão em T3



4.4. Confecção do mapa de cobertura do solo

Se comparado ao mapeamento do uso do solo, o mapeamento de sua cobertura exige uma interpretação generalizada e menos semântica dos elementos presentes na imagem, seu relacionamento, *status* ou função no contexto geográfico. A cobertura do solo trata de uma tradução simples que melhor represente a classe predominante sobre a porção da superfície terrestre na qual a feição geográfica em análise está inserida. Apesar de teoricamente mais simples, a classificação de cobertura do solo exige um esforço adicional à interpretação humana pois requer a sintetização e agregação das informações. Todavia, para a automatização do processo por meio de algoritmos computacionais, seu emprego passa a ser potencializado pela simples interpretação direta das respostas espectrais dos *pixels* da imagem sem a necessidade de adicionar descritores semânticos para dar significado às classes.

Para atender o propósito da criação do banco de dados para alimentação do classificador supervisionado por *deep learning*, foi necessária a adaptação dos mapas de uso e ocupação do solo para as três datas em estudo. Neste processo, algumas das categorias anteriormente classificadas e vetorizadas como uso do solo foram agrupadas para este treinamento. Assim, como pode ser visto na Figura 30, para a cobertura de elemento do meio físico, das 21 classes de uso e ocupação do solo foram agrupadas em 10 classes de cobertura descritas na Tabela 9.

Tema	Cobertura da Terra	Classes de Uso incorporadas
Elemento do meio físico	Vegetação arbórea	- Floresta Estacional Semidecidual
	Vegetação arbustiva	- Cerrado
	Vegetação rasteira	- Campos de Altitude - Pastagem - Pastagem degradada - Unidade rural (incluindo os galpões)
	Rio	- Rio Paraopeba
	Lâmina de água	- Açudes - Barragens de água
Elemento do meio rural	Atividade agrícola	- Atividade agrícola
Solo	Espalhamento da lama	- Espalhamento da lama - Mineração
	Mineração	- Mineração



Tema	Cobertura da Terra	Classes de Uso incorporadas
Extrativismo Mineral	Mineração	- Barragem de rejeito ¹⁴
Infraestrutura Urbana	Urbano	- Vila/cidade
Infraestrutura de Tratamento	ETAF	- ETAF
Outros	Diversos	- Escritório/Sede social - Galpões

Tabela 9 - Agrupamento das classes de uso e cobertura da terra em classes de cobertura para o treinamento do classificador Deep Learning.

Desta forma, estas classes foram transformadas em mapas para os três tempos analisados (T1, T2 e T3) como pode ser observado nas Figura 29.

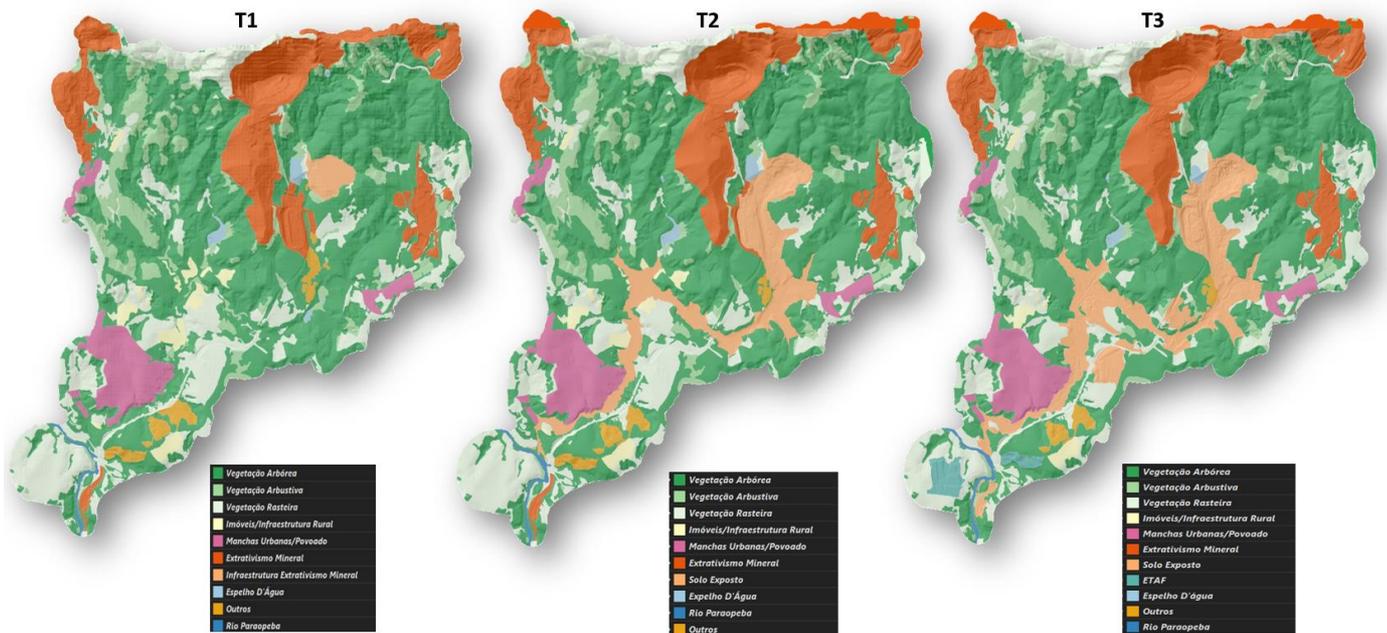


Figura 30 - Mapas de cobertura do solo com agrupamento de classes para os períodos T1 - mosaico de passagens de 15 e 23 de dezembro de 2018 (esquerda), T2 – janeiro de 2019 logo após o rompimento da barragem B1 (centro) e T3 – abril de 2020, um ano após o início do processo de recuperação da área atingida pela lama.

4.5. Áreas de proteção permanente (APP)

Conforme exposto no documento de proposta, foram consideradas as APPs de topo de morro (ocorrência nas cumeadas e proximidades, com objetivo de preservar a vegetação nativa e a

¹⁴ Classe existente somente para T1.



captação/retenção de água), APPs de encosta (ocorrência em áreas de declividade acentuada, com a finalidade de proteger as encostas), APPs de hidrografia que incluem a faixas variáveis marginais aos cursos d'água de acordo com a largura do mesmo e APPs de nascentes para preservar de forma natural o ambiente sensível do entorno das nascentes, conforme Código Florestal (Lei Federal nº 12.651/2012). Os conceitos definidores das APPs podem ser acessados no portal sobre adequação ambiental da paisagem rural da EMBRAPA.

4.5.1. APP de cursos d'água e APP de nascente

Exceto o rio Paraopeba, todos os demais cursos d'água presentes na área de estudo apresentam largura inferior a 10m, o que caracteriza suas respectivas APPs como um polígono envolvente com 30m para cada lado, contado a partir do eixo central do rio. Por sua vez, o rio Paraopeba apresenta características distintas dos demais cursos d'água, e a largura entre suas margens ao longo da área de estudo apresenta variação entre 35 e 84 metros conforme medidas extraídas da imagem orbital no período T1. Essa variação de largura faz com que a APP do rio Paraopeba varie entre 50m e 100m medidos a partir das margens (Figura 31).

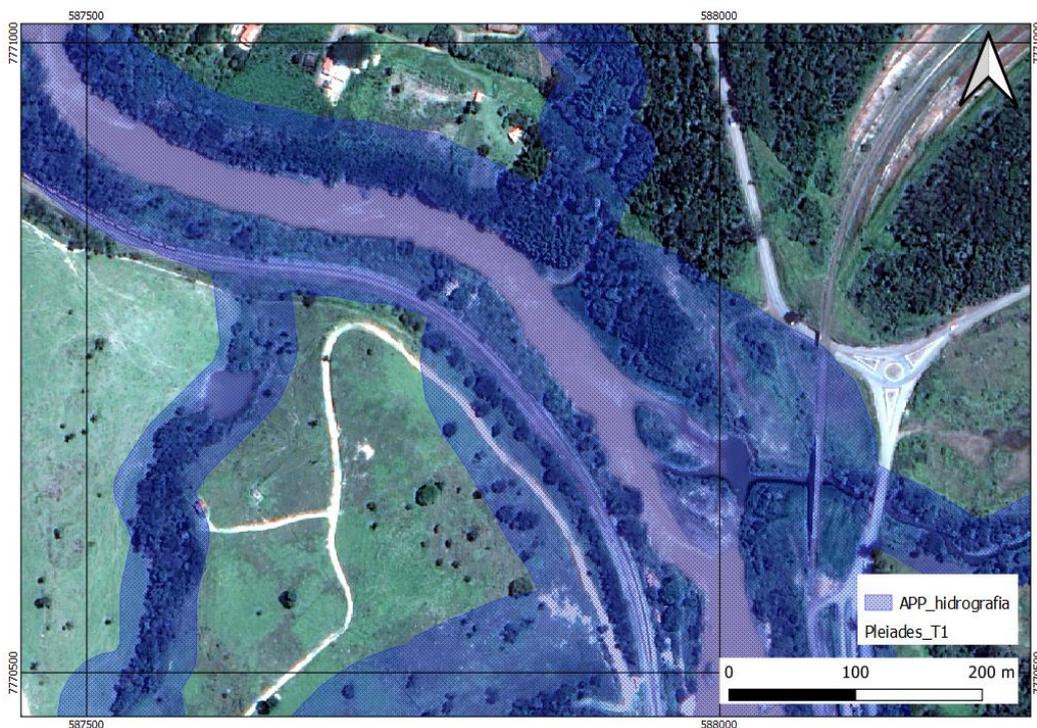


Figura 31- Ilustração de Áreas de Proteção do rio Paraopeba com largura variando entre 50 e 100m.

Para os demais cursos d'água foi calculado o *buffer* de 30m conforme ilustra a Figura 32. De forma análoga aos cursos d'água, foram um polígono com raio de 50m foi criado a partir de



cada nascente (Figura 33). As nascentes foram estimadas através da análise conjunta das imagens orbitais e do modelo digital de terreno proveniente do perfilamento *laser*, este já fornecido com filtragem dos ruídos provenientes da superfície das copas de árvore (filtragem lidar pelo último sinal de retorno). Foram também utilizadas cartas pretéritas produzidas por estereoscopia em escala 1:25.000 e imagens do drone para apoiar a identificação das nascentes nas áreas inacessíveis da bacia.

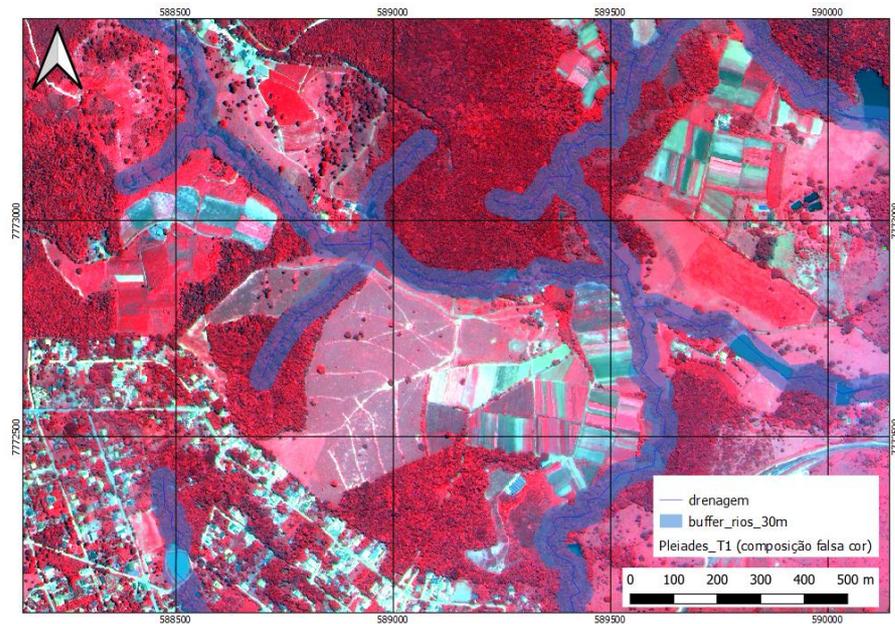


Figura 32- Ilustração de Áreas de Proteção de curso d'água na porção baixa da sub-bacia.

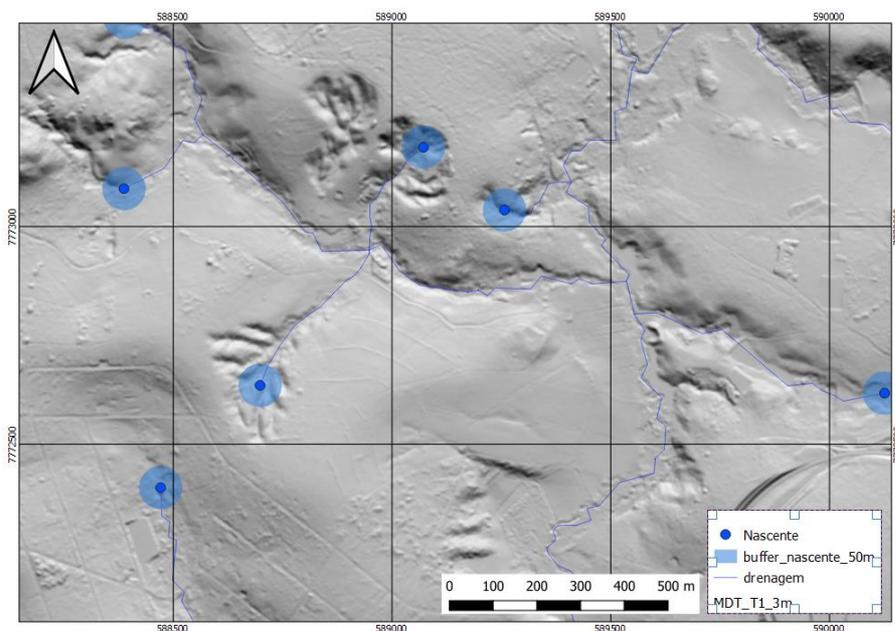


Figura 33- Ilustração de Áreas de Proteção de nascentes na mesma porção baixa da sub-bacia da figura acima.



4.5.2. APP de topo de morro

As APPs de topo de morro são definidas como sendo a área ocupada pelo terço superior dos morros que satisfazem simultaneamente a condição de possuírem declividade média igual ou superior a 25° e de possuírem elevação igual ou superior a 100m em relação à base (ponto de sela). Assim, a primeira etapa para o mapeamento das APPs de topo de morro consistiu na análise da superfície topográfica para identificação das áreas correspondentes às duas condicionantes supracitadas.

Para a determinação das áreas com declividade igual ou superior a 25° foram executados 2 passos:

- Cálculo da superfície de declividade em graus decimais;
- Seleção dos *pixels* com valor de declividade igual ou superior a 25°.

Já para a segunda condicionante, foi necessário a execução da sequência de passos

- Cálculo do modelo digital de terreno hidrologicamente consistente, que corresponde a superfície de elevação com preenchimento de depressões;
- Inversão do modelo digital de terreno hidrologicamente consistente;
- Cálculos das sub-bacias na superfície do modelo digital de terreno hidrologicamente consistente que foi invertido. Na prática esse procedimento consiste na determinação dos limites das linhas de sela;
- Conversão dos resultados dos polígonos de linha de sela em formato vetorial;
- Extração da amplitude (altitude máxima – altitude mínima) dos polígonos na tabela de atributos e
- Exclusão dos polígonos com amplitude inferior a 100m, resultando apenas os denominados morros;



- Cálculo do terço superior de cada polígono, desenvolvido por uma equação¹⁵ simples que considera a diferença entre a altitude máxima e a amplitude do morro, cujo resultado é dividido por três, seguido pela rasterização do resultado;

O procedimento foi desenvolvido na plataforma QGIS, contudo a descrição acima é plenamente possível de ser realizada no arcGIS e/ou similares. A Figura 34 ilustra em detalhes uma região com a presença de APPs de topo de morro na área de estudo.

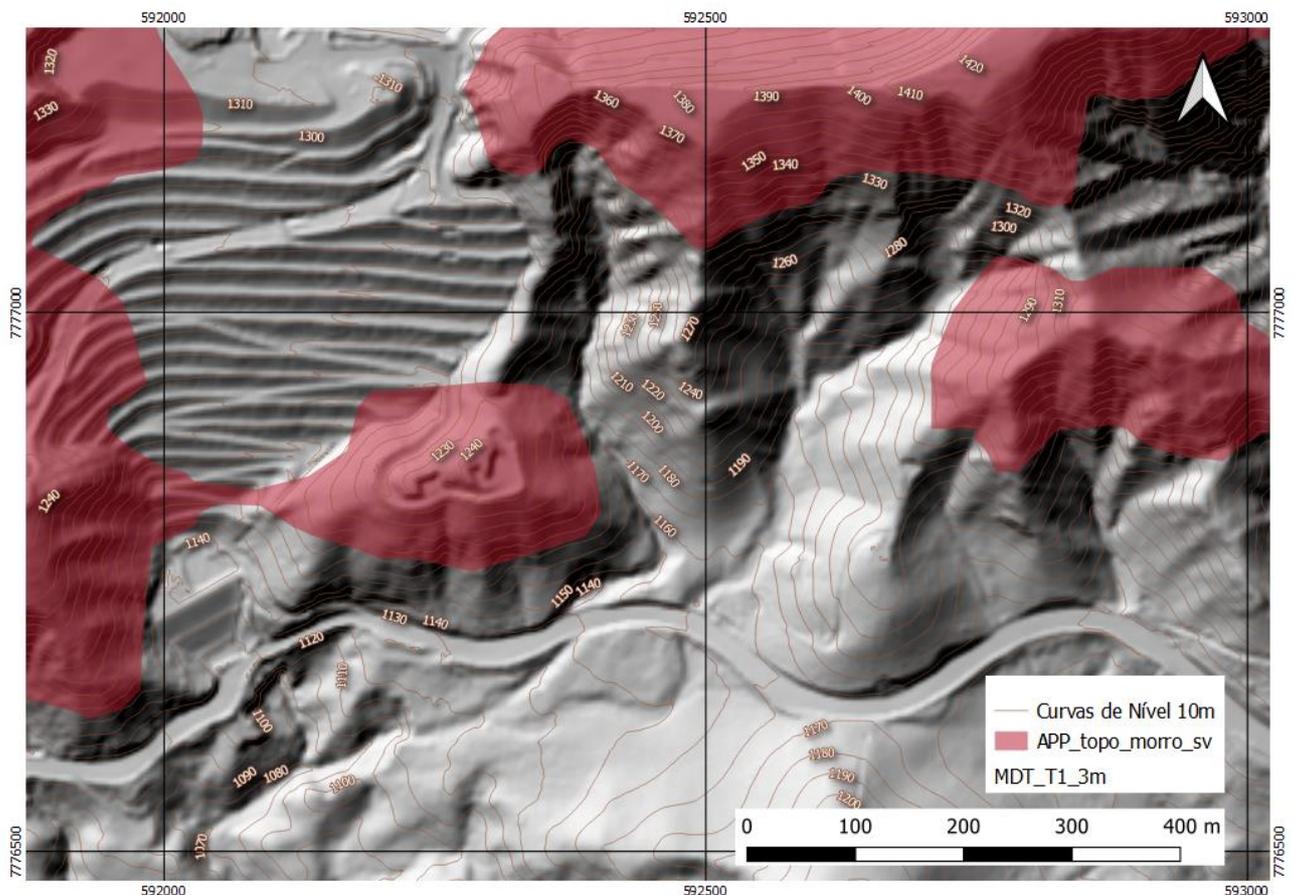


Figura 34- Ilustração de Áreas de Proteção em encostas na porção alta da área de estudo.

4.5.3. APP de encosta

As APPs de encosta são definidas pelos terrenos em aclave ou declive superiores a 45° ou 100% de rampa. Na prática, essas APPs são as mais simples de serem mapeadas, a depender de dados

¹⁵ Topo de morro = (Altitude máxima – Amplitude) / 3



altimétricos com precisão compatível à necessidade do estudo. Para o mapeamento das APPs do presente projeto foram utilizados os seguintes passos:

- Reamostragem do Modelo Digital de Terreno compatível ao período T1 para a resolução espacial de 3m, reduzindo com isso pequenos ruídos na imagem;
- Cálculo da superfície de declividade;
- Seleção dos pixels com declividade superior a 45° (ou superiores a 100% caso a declividade seja calculada em porcentagem de rampa);
- Conversão das áreas selecionadas no passo anterior em vetores para determinação dos polígonos de APP de encosta.

A Figura 35 ilustra em detalhes uma região com a presença de APPs de encosta na área de estudo. O mapa final contendo todas as APPs inseridos na moldura cartográfica do projeto está apresentado no Anexo IV.

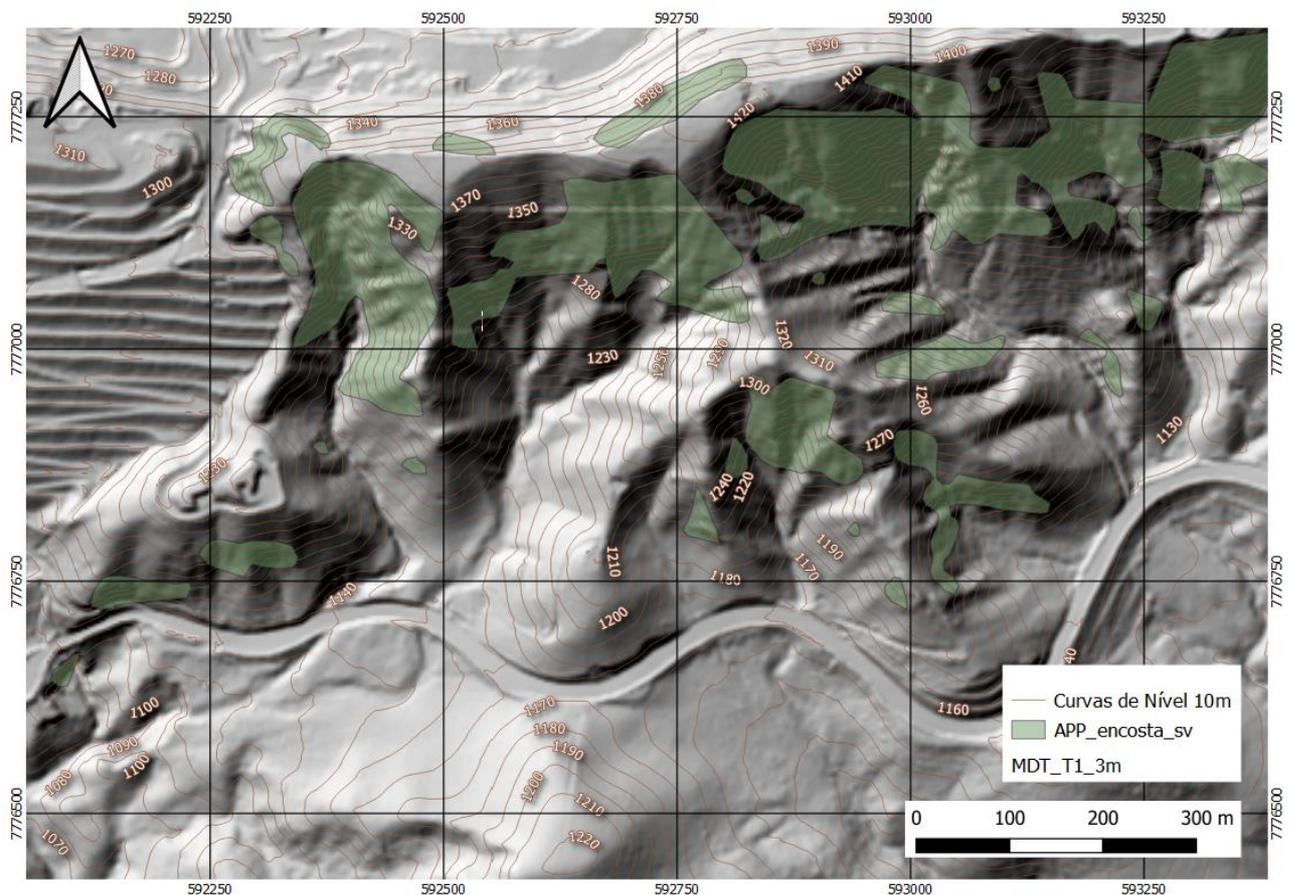


Figura 35 - Ilustração de Áreas de Proteção em encostas na porção alta da área de estudo.



4.6. Reserva Legal

Uma reserva legal corresponde a uma porção de uma propriedade rural autodeclaradas como área de reserva pelo proprietário junto ao Instituto Nacional da Colonização e Reforma Agrária (INCRA). O rito visa cumprir Lei Nº 12.651/2012 no âmbito do Sistema Nacional de Informação sobre Meio Ambiente (SINIMA), e regulamentado pela Instrução Normativa Nº 2, de 5 de maio de 2014 do Ministério do Meio Ambiente, e sistematizado pelo Cadastro Ambiental Rural (CAR), sendo este um registro público eletrônico de âmbito nacional proposto para integrar informações de caráter ambiental das propriedades rurais no tocante a APP, área de uso restrito, área de reserva legal, remanescentes florestais e demais formas de vegetação nativa para fins de controle, monitoramento, planejamento econômico e ambiental e ações de combate ao desmatamento .

Os dados da reserva legal foram extraídos diretamente da base de dados do Cadastro Ambiental Rural e apenas importados para o mapa-base da área de estudo do Subprojeto 2. Por ser um dado oficial importado do banco de dados CAR, é importante ressaltar que os polígonos das áreas e reserva legal não foram calculados, interpretados ou cartografados no escopo das atividades do presente subprojeto. Os dois únicos processamentos realizados foram a seleção e recorte para atendimento a área de estudo, seguido da projeção cartográfica para SIRGAS2000_UTM23Sul para compatibilidade à base de dados do subprojeto. A Figura 37 ilustra o resultado.

A página eletrônica do Sistema Nacional de Cadastro Ambiental Rural de onde foi feito o download dos dados das propriedades rurais na área de estudo, incluindo as informações sobre áreas de Reserva Legal, pode ser acessada no endereço: <https://www.car.gov.br/#/>



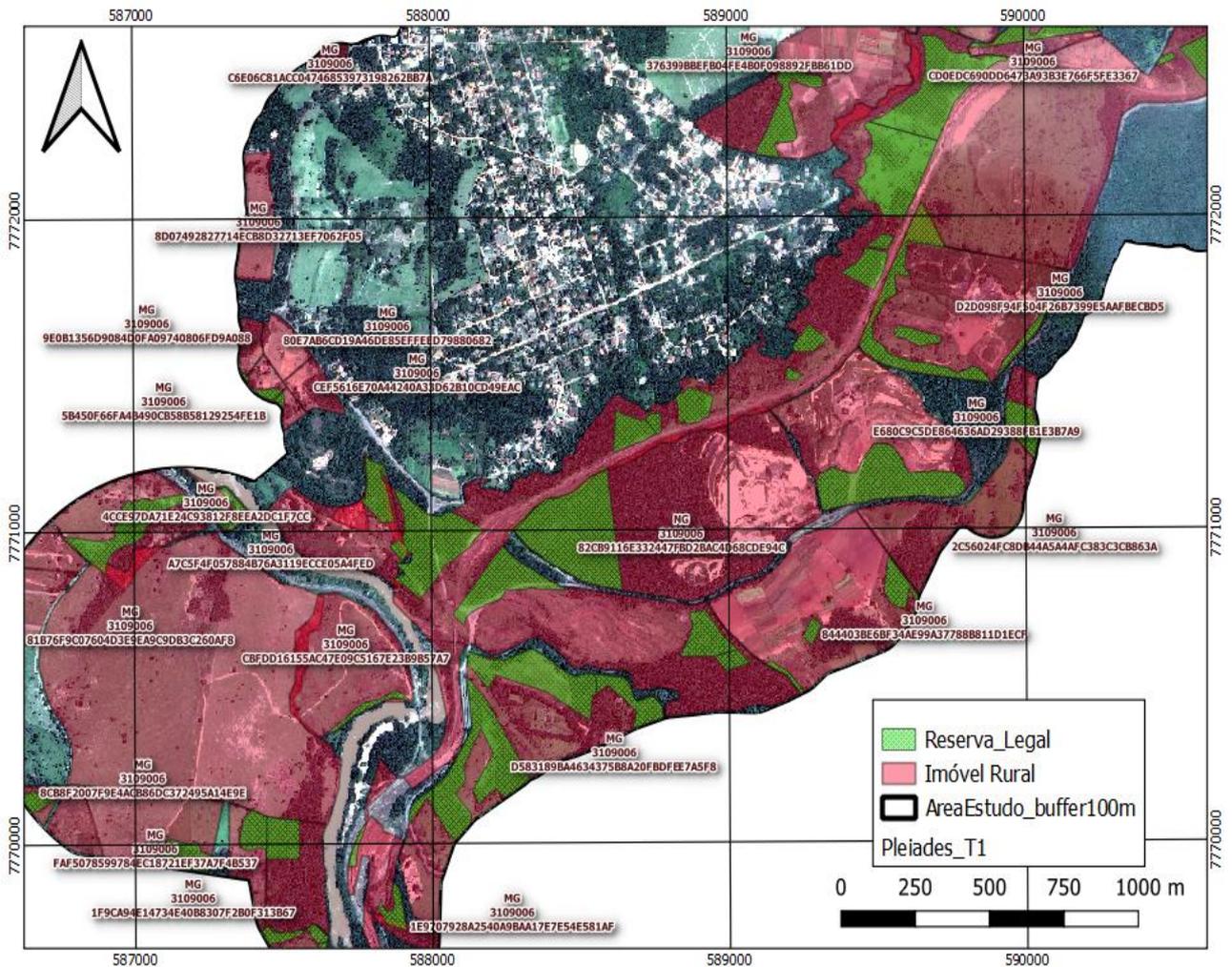


Figura 36- Ilustração de parte das áreas de reserva legal e dos polígonos dos imóveis rurais do Cadastro Ambiental Rural (CAR) presentes na área de estudo.

5. Tabulações e análises

Esta seção apresenta em detalhes o processo analítico das classificações de cobertura e uso do solo nos três períodos investigados, bem como análises destes produtos em relação as APPs.

5.1. Uso e cobertura do solo na área de estudo

Os resultados do mapeamento do uso e cobertura do solo podem ser observados na Tabela 10 e Figura 37. De maneira geral, houve uma redução das áreas totais de vegetação natural (floresta



estacional semidecidual e cerrado) e de unidades de produção agrícola para os 3 tempos analisados.

Uso e cobertura do solo	Tempo 1		Tempo 2		Tempo 3	
	Área total (ha)	Área relativa (%)	Área total (ha)	Área relativa (%)	Área total (ha)	Área relativa (%)
Floresta Estacional Semidecidual	1873,74	47,65	1749,67	44,49	1747,24	44,43
Cerrado	342,04	8,70	321,74	8,18	316,90	8,06
Campos de Altitude	96,81	2,46	96,81	2,46	96,81	2,46
Vegetação Degradada	104,78	2,66	99,27	2,52	85,36	2,17
Unidade Rural	194,08	4,94	174,61	4,44	118,16	3,00
Galpões	2,66	0,07	2,66	0,07	2,63	0,07
Tanques e Açudes	8,18	0,21	5,29	0,13	5,29	0,13
Área de Cultivo	68,86	1,75	51,62	1,31	30,04	0,76
Pastagem	337,02	8,57	329,01	8,37	271,37	6,90
Pastagem Degradada	22,96	0,58	22,99	0,58	20,56	0,52
Manchas Urbanas/Povoados	182,04	4,63	176,80	4,50	176,83	4,50
Estação de Tratamento de Resíduos Sólidos - ETRS	12,10	0,31	12,10	0,31	12,11	0,31
Mineração/Cava	581,67	14,79	544,61	13,85	528,14	13,43
Escritórios e Sede Social	16,01	0,41	5,87	0,15	6,85	0,17
Área de Manutenção de Equipamentos	10,50	0,27	10,50	0,27	10,49	0,27
Barragens de Rejeito	43,48	1,11	0,00	0,00	0,00	0,00
Espalhamento da Lama	0,00	0,00	299,22	7,61	0,00	0,00
Lama e Obras de Recuperação	0,00	0,00	0,00	0,00	431,90	10,98
Estação de Tratamento de Águas Fluviais - ETAF	0,00	0,00	0,00	0,00	41,69	1,06
Barragens de Água	23,52	0,60	17,03	0,43	16,84	0,43
Rio Paraopeba	11,90	0,30	12,58	0,32	13,21	0,34

Tabela 10- Evolução do uso e cobertura do solo na área de estudo, nos Tempos 1, 2 e 3.



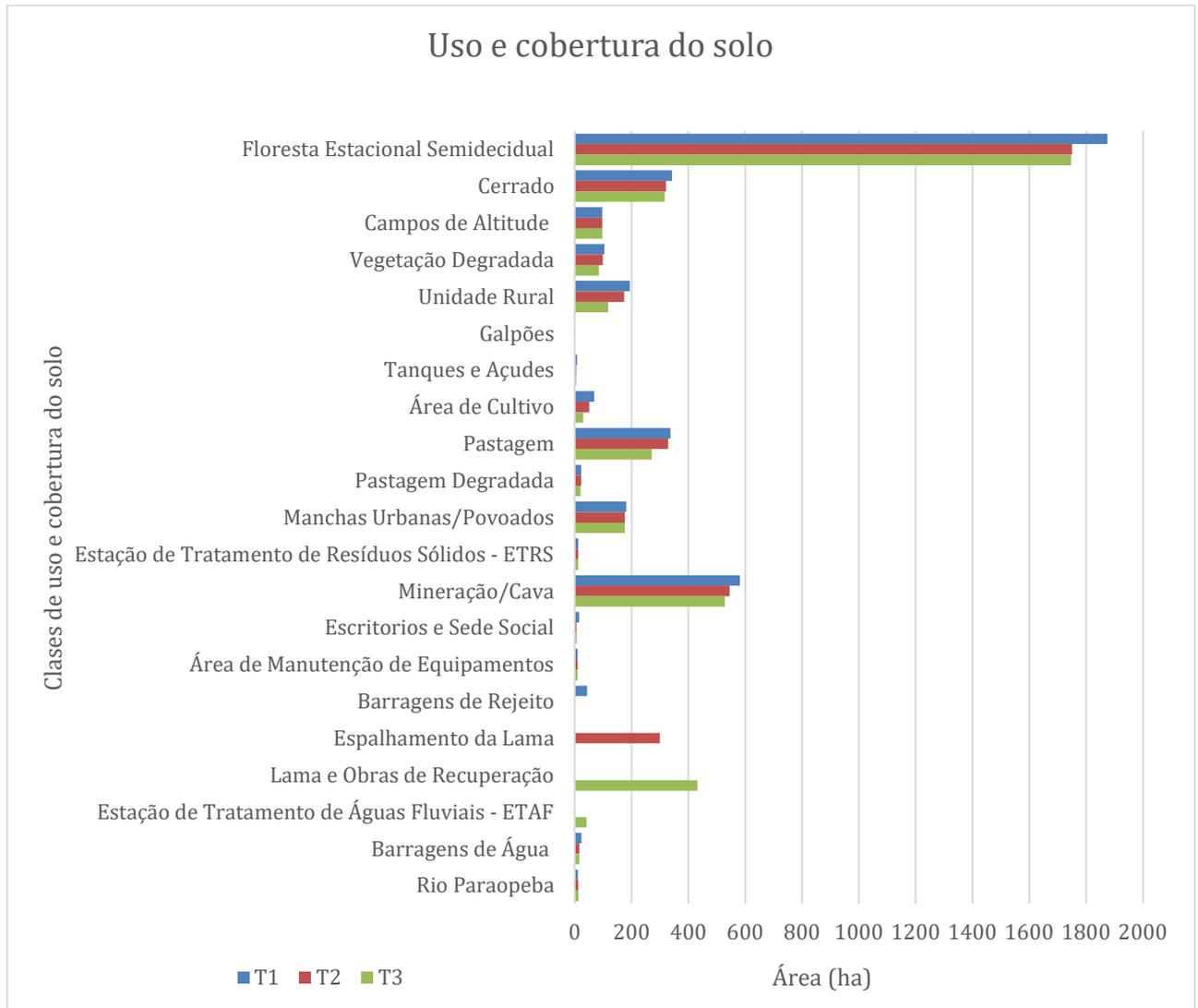


Figura 37 - Evolução do uso e cobertura do solo na área de estudo, nos Tempos 1, 2 e 3.

5.2. Transição no uso e cobertura do solo na área de estudo

A matriz de transição das classes de uso e cobertura do solo entre os períodos T1 e T2 mostra que a maior parte dos tipos de usos foram afetados pela lama após o rompimento da barragem. Em termos percentuais, destacam-se as áreas de escritórios da mineradora (63%), tanques e açudes (30%), as barragens de água (27%), e áreas de cultivo (24%) (Tabela 11). Em relação a transição entre T2 e T3, nota-se a grande modificação nas áreas adjacentes ao rompimento, mapeadas como “lama e obras de recuperação”. No entanto, as modificações na bacia também ocorreram na transição entre outras classes (Tabela 12). Em termos percentuais, entre o T2 e T3, pastagens e áreas degradadas (34%) e áreas de cultivo remanescentes (26%) continuaram sendo alteradas devido as diversas intervenções no vale. No T3 também ocorreu a construção de 2 ETAFs (Tabela 13).



Projeto Brumadinho UFMG

		Uso de cobertura do solo no T2																		
		Floresta Estacional Semidecidual	Cerrado	Campos de Altitude	Vegetação Degradada	Unidade Rural	Galpões	Tanques e Açudes	Área de Cultivo	Pastagem	Pastagem Degradada	Manchas Urbanas/Povoados	Estação de Tratamento de Resíduos Sólidos - ETRS	Mineração/Cava	Escritórios e Sede Social	Área de Manutenção de Equipamentos	Espalhamento da Lama	Barragens de Água	Rio Paraopeba	
Uso e cobertura do solo no T1	Floresta Estacional Semidecidual	1747,3371	0,1152	0	0,0419	0,0004	0	0,0082	0	0	0	0	0	0	0	0	126,0176	0	0,2175	
	Cerrado	0,2888	320,5542	0	0	0	0	0	0	0,0032	0	0	0	0	0	0	20,9573	0	0,2373	
	Campos de Altitude	0	0	96,8125	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Vegetação Degradada	0,0511	0	0	99,109	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4,5132	0	1,1115	
	Unidade Rural	0,797	0,9304	0	0,0891	173,9234	0	0	0	0,005	0,0106	0	0	0	0,0104	0	18,2885	0	0,0287	
	Galpões	0	0	0	0	0	2,6605	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Tanques e Açudes	0,1291	0	0	0	0,052	0	5,2842	0	0	0	0	0	0,1867	0	0	2,5234	0	0	
	Área de Cultivo	0,0001	0	0	0	0,5651	0	0	51,6222	0,0002	0	0	0	0	0	0	16,6697	0	0	
	Pastagem	0,1863	0	0	0	0	0	0	0,002	329,0052	0,0721	0	0	0	0	0	7,5947	0	0,1615	
	Pastagem Degradada	0	0	0	0	0	0	0	0	0	22,9079	0	0	0	0	0	0,056	0	0	
	Manchas Urbanas/Povoados	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	176,7998	0	0	0	0	5,2429	0	0	
	Estação de Tratamento de Resíduos Sólidos - ETRS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12,1026	0	0	0	0	0	0	
	Mineração/Cava	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	544,4201	0	0	37,2536	0	0	
	Escritórios e Sede Social	0	0	0	0	0,0435	0	0	0	0	0	0	0	0	5,8595	0	10,1089	0	0	
	Área de Manutenção de Equipamentos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10,4964	0	0	0	
	Barragens de Rejeito	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	43,4811	0	0	
	Barragens de Água	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6,499	17,0254	0	
Rio Paraopeba	0,878	0,1352	0	0,0281	0,0263	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,014	0	10,8197		

Tabela 11- Matriz de transição 2 do uso e cobertura do solo na área de estudo entre os Tempos T1 e T2, em valores absolutos.



Projeto Brumadinho UFMG

		Uso de cobertura do solo no T2																	
Uso e cobertura do solo no T1		Floresta Estacional Semidecidual	Cerrado	Campos de Altitude	Vegetação Degradada	Unidade Rural	Galpões	Tanques e Açudes	Área de Cultivo	Pastagem	Pastagem Degradada	Manchas Urbanas/Povoados	Estação de Tratamento de Resíduos Sólidos - ETRS	Mineração/Cava	Escritórios e Sede Social	Área de Manutenção de Equipamentos	Espalhamento da Lama	Barragens de Água	Rio Paraopeba
		Floresta Estacional Semidecidual	93,25%	0,01%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	6,73%	0%
	Cerrado	0,08%	93,72%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	6,13%	0%	0,07%
	Campos de Altitude	0%	0%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	Vegetação Degradada	0,05%	0%	0%	94,58%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	4,31%	0%	1,06%
	Unidade Rural	0,41%	0,48%	0%	0,05%	89,61%	0%	0%	0%	0,01%	0%	0%	0%	0%	0,01%	0%	9,42%	0%	0,01%
	Galpões	0%	0%	0%	0%	0%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	Tanques e Açudes	1,58%	0%	0%	0%	0,64%	0%	64,64%	0%	0%	0%	0%	0%	2,28%	0%	0%	30,87%	0%	0%
	Área de Cultivo	0%	0%	0%	0%	0,82%	0%	0%	74,97%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	24,21%	0%	0%
	Pastagem	0,06%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	97,62%	0,02%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	2,25%	0%	0,05%
	Pastagem Degradada	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	99,76%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0,24%	0%	0%
	Manchas Urbanas/Povoados	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	97,12%	0%	0%	0%	0%	0%	2,88%	0%	0%
	Estação de Tratamento de Resíduos Sólidos - ETRS	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	Mineração/Cava	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	93,60%	0%	0%	0%	6,40%	0%	0%
	Escritórios e Sede Social	0%	0%	0%	0%	0,27%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	36,59%	0%	63,13%	0%	0%	0%
	Área de Manutenção de Equipamentos	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	0%	0%	0%	0%
	Barragens de Rejeito	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	0%	0%
	Barragens de Água	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	27,63%	72,37%	0%
	Rio Paraopeba	7,38%	1,14%	0%	0,24%	0,22%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0,12%	0%	90,91%

Tabela 12- Matriz de transição 2 do uso e cobertura do solo na área de estudo entre os Tempos T1 e T2, em valores percentuais de manutenção ou transformação entre T1 e T2.



Projeto Brumadinho UFMG

		Uso de cobertura do solo no T3																			
		Floresta Estacional Semidecidual	Cerrado	Campos de Altitude	Vegetação Degradada	Unidade Rural	Galpões	Tanques e Açudes	Área de Cultivo	Pastagem	Pastagem Degradada	Manchas Urbanas/Povoados	Estação de Tratamento de Resíduos Sólidos - ETRS	Mineração/Cava	Escritórios e Sede Social	Área de Manutenção de Equipamentos	Lama e Obras de Recuperação	Estação de Tratamento de Águas Fluviais - Barragens de Água	Rio Paraopeba		
Uso e cobertura do solo no T2	Floresta Estacional Semidecidual	1713,0938	2,8446	0,0004	2,1763	0,91	0,0027	0,4733	0	0,3728	0,0428	0,0089	0	2,4832	0,4432	0	25,3856	0	0,2419	1,1844	
	Cerrado	7,4286	307,8107	0	1,3958	0,9974	0	0	0,639	0,5829	0,0008	0	0	0	0	0	1,8715	0	0,825	0,1833	
	Campos de Altitude	0	0	96,8125	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Vegetação Degradada	6,9299	0,8202	0	74,2117	0,1753	0	0,1481	0	0,9002	0	0	0	0,3768	0	0	3,7096	11,7686	0,0848	0,1429	
	Unidade Rural	5,8094	2,5068	0	0,0714	115,1908	0	0,1381	0	1,1689	4,7291	0	0	0	1,5127	0	43,4141	0	0	0,0689	
	Galpões	0,0287	0	0	0	0	2,6318	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Tanques e Açudes	0,1785	0	0	0	0,313	0	3,602	0	0,0151	0	0,0356	0,0112	0,3305	0	0	0,8065	0	0	0	
	Área de Cultivo	0,995	0,4699	0	4,9607	0,151	0	0,0521	29,0277	0,1071	2,4153	0	0	0	0	0	13,4454	0	0	0	
	Pastagem	1,5111	0,0495	0	0	0	0	0,0032	0,0032	266,7958	0,052	0	0	0	0	0	30,6791	29,9165	0	0	
	Pastagem Degradada	0,427	0	0	0,1566	0	0	0	0,3685	0,8599	13,2992	0	0	0	0	0	7,8826	0	0	0	
	Manchas Urbanas/Povoados	0,3643	0	0	0	0	0	0,0737	0	0,2552	0	175,9161	0	0	0	0	0,1905	0	0	0	
	Estação de Tratamento de Resíduos Sólidos - ETRS	0	0	0	0	0	0	0	0,0055	0	0	0	12,0971	0	0	0	0	0	0	0	
	Mineração/Cava	4,0792	0,0682	0	0,0012	0	0	0,3515	0	0	0	0	0	524,9446	0	0	15,0979	0	0,0642	0	
	Escritórios e Sede Social	0,9657	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4,8208	0	0,0834	0	0	0	
	Área de Manutenção de Equipamentos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0036	0	0	10,4928	0	0	0	0	
	Espalhamento da Lama	4,7056	0,2881	0	1,9513	0,3769	0	0,4478	0	0,1344	0,021	0,8645	0	0	0,0726	0	289,1713	0	1,1582	0,0291	
	Barragens de Água	0,5428	1,7999	0	0,1212	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0938	0	14,4677	0	
	Rio Paraopeba	0,1453	0,2376	0	0,3027	0,0415	0	0	0	0,1778	0	0	0	0	0	0	0,069	0	0	11,6023	

Tabela 13 - Matriz de transição 2 do uso e cobertura do solo na área de estudo entre os Tempos T2 e T3, em valores absolutos.



Projeto Brumadinho UFMG

		Uso de cobertura do solo no T3																			
		Floresta Estacional Semidecidual	Cerrado	Campos de Altitude	Vegetação Degradada	Unidade Rural	Galpões	Tanques e Açudes	Área de Cultivo	Pastagem	Pastagem Degradada	Manchas Urbanas/Povoados	Estação de Tratamento de Resíduos Sólidos - ETRS	Mineração/Cava	Escritórios e Sede Social	Área de Manutenção de Equipamentos	Lama e Obras de Recuperação	Estação de Tratamento de Águas Fluviais - ETAF	Barragens de Água	Rio Paraopeba	
Uso e cobertura do solo no T2	Floresta Estacional Semidecidual	97,91%	0,16%	0%	0,12%	0,05%	0%	0,03%	0%	0,02%	0%	0%	0%	0,14%	0,03%	0%	1,45%	0%	0,01%	0,07%	
	Cerrado	2,31%	95,67%	0%	0,43%	0,31%	0%	0%	0,20%	0,18%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0,58%	0%	0,26%	0,06%	
	Campos de Altitude	0%	0%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	Vegetação Degradada	6,98%	0,83%	0%	74,76%	0,18%	0%	0,15%	0%	0,91%	0%	0%	0%	0,38%	0%	0%	3,74%	11,86%	0,09%	0,14%	
	Unidade Rural	3,33%	1,44%	0%	0,04%	65,97%	0%	0,08%	0%	0,67%	2,71%	0%	0%	0%	0,87%	0%	24,86%	0%	0%	0,04%	
	Galpões	1,08%	0%	0%	0%	0%	98,92%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
	Tanques e Açudes	3,37%	0%	0%	0%	5,91%	0%	68,06%	0%	0,29%	0%	0,67%	0,21%	6,24%	0%	0%	15,24%	0%	0%	0%	
	Área de Cultivo	1,93%	0,91%	0%	9,61%	0,29%	0%	0,10%	56,23%	0,21%	4,68%	0%	0%	0%	0%	0%	26,04%	0%	0%	0%	
	Pastagem	0,46%	0,02%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	81,09%	0,02%	0%	0%	0%	0%	0%	9,32%	9,09%	0%	0%	
	Pastagem Degradada	1,86%	0%	0%	0,68%	0%	0%	0%	1,60%	3,74%	57,84%	0%	0%	0%	0%	0%	34,28%	0%	0%	0%	
	Manchas Urbanas/Povoados	0,21%	0%	0%	0%	0%	0%	0,04%	0%	0,14%	0%	99,50%	0%	0%	0%	0%	0,11%	0%	0%	0%	
	Estação de Tratamento de Resíduos Sólidos - ETRS	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0,05%	0%	0%	0%	99,95%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
	Mineração/Cava	0,75%	0,01%	0%	0%	0%	0%	0,06%	0%	0%	0%	0%	0%	96,39%	0%	0%	2,77%	0%	0,01%	0%	
	Escritórios e Sede Social	16,45%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	82,13%	0%	1,42%	0%	0%	0%	
	Área de Manutenção de Equipamentos	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0,03%	0%	0%	99,97%	0%	0%	0%	0%	
	Espalhamento da Lama	1,57%	0,10%	0%	0,65%	0,13%	0%	0,15%	0%	0,04%	0,01%	0,29%	0%	0%	0,02%	0%	96,64%	0%	0,39%	0,01%	
	Barragens de Água	3,19%	10,57%	0%	0,71%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0,55%	0%	84,98%	0%	
	Rio Paraopeba	1,16%	1,89%	0%	2,41%	0,33%	0%	0%	0%	1,41%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0,55%	0%	0%	92,26%	

Tabela 14- Matriz de transição 2 do uso e cobertura do solo na área de estudo entre os Tempos T2 e T3, em valores percentuais de manutenção ou transformação entre T2 e T3.



A Figura 38 mostra a transição entre T1-T2-T3, apresentado as classes de uso de maneira simplificada, para facilitar a análise. Nota-se que a classe referida como lama (espalhamento no T2 e lama e obras no T3) ocorreu em áreas notadamente de vegetação natural (floresta estacional semidecidual e cerrado) e da área da mineração, incluindo os escritórios, sede, cava e as barragens de rejeito pré-rompimento. Também é notável a crescente diminuição da área agrícola ao longo do tempo, sobretudo na transição entre T2 e T3.

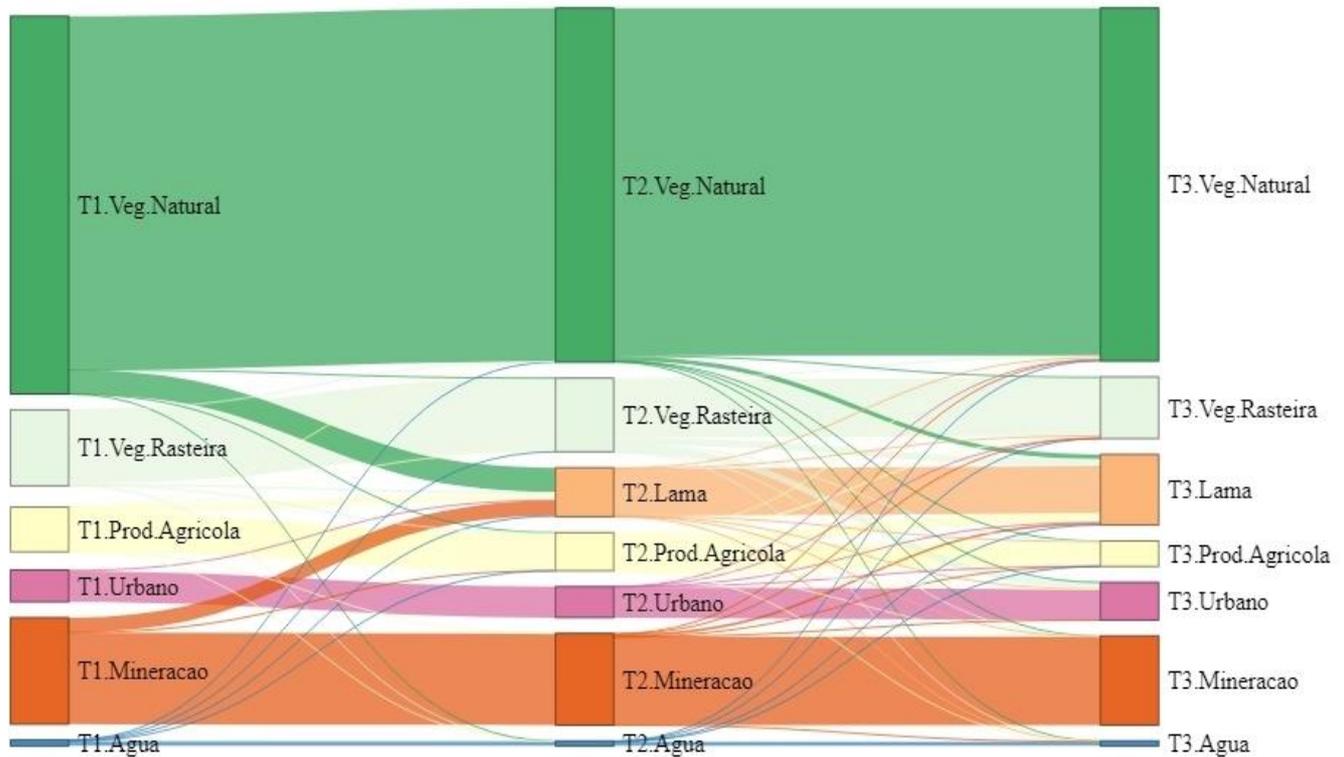


Figura 38 - Diagrama de transição da cobertura do solo simplificada na área de estudo entre os Tempos T1, T2 e T3. Veg.Natural: Floresta estacional semidecidual, cerrado e campos de altitude; Veg.Rasteira: Vegetação degradada, pastagem e pastagem degradada; Prod.Agrícola: Unidade rural, galpões, tanques e açudes, área de cultivo; Urbano: Manchas urbanas povoado, Estação de Tratamento de Resíduos Sólidos – ETRS e Estação de Tratamento de Águas Fluviais – ETAF; Mineração: Mineração/Cava; escritórios e Sede Social; Área de Manutenção de Equipamentos; Barragens de Rejeito (T1); Água: Rio Paraopeba, barragens de água; Lama: Espalhamento da Lama (T2), Lama e Obras de Recuperação (T3).

5.3. Uso e cobertura do solo dentro das APPs identificadas

A análise das classes mapeadas de uso e cobertura do solo nas APPs reportada nesta seção está dividida por tipo (APP de encosta, APP de topo de morro e APP de hidrografia, conforme organização previamente apresentada na seção 3.5. Em relação as APPs de encosta e topo de morro, não houve qualquer alteração nas classes de uso e cobertura do solo entre os Tempos T1-T2 e T2-T3 (Tabelas 15 e 16; Figuras 39 e 40). No geral estas APPs ocorrem nas áreas mais



altas, declivosas e isoladas da bacia, o que explica o fato das mesmas não apresentarem modificações decorrentes do rompimento ou das obras de recuperação correlatas. Contudo, é importante também considerar que não houveram atividades de mineração na área após o rompimento da barragem B1.

App Encosta						
Uso e cobertura do solo	Tempo 1		Tempo 2		Tempo 3	
	Área total (ha)	Área relativa (%)	Área total (ha)	Área relativa (%)	Área total (ha)	Área relativa (%)
Floresta Estacional Semidecidual	11,21	27,89%	11,21	27,89%	11,21	27,89%
Cerrado	8,74	21,75%	8,74	21,75%	8,74	21,75%
Campos de Altitude	16,13	40,12%	16,13	40,12%	16,13	40,13%
Vegetação Degradada	0,25	0,62%	0,25	0,62%	0,25	0,62%
Mineração/Cava	3,86	9,61%	3,86	9,61%	3,86	9,61%

Tabela 15 - Evolução do uso e cobertura do solo na App de encosta, nos Tempos 1, 2 e 3.

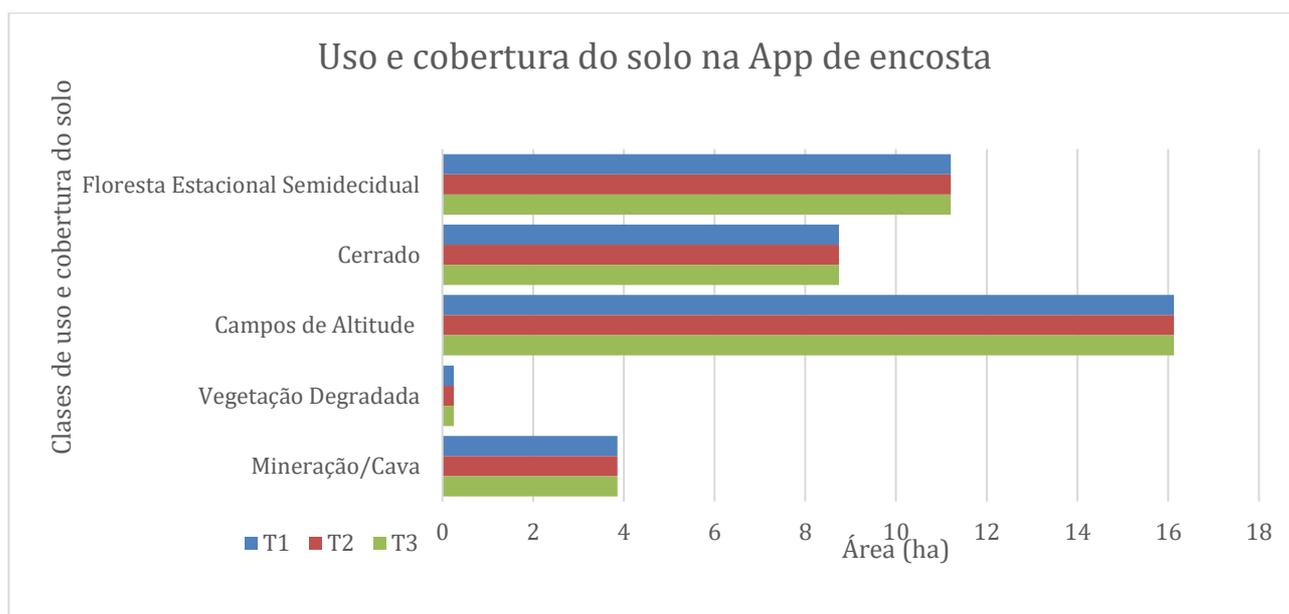


Figura 39 - Evolução do uso e cobertura do solo na App de encosta, nos Tempos 1, 2 e 3.



App Topo de Morro						
Uso e cobertura do solo	Tempo 1		Tempo 2		Tempo 3	
	Área total (ha)	Área relativa (%)	Área total (ha)	Área relativa (%)	Área total (ha)	Área relativa (%)
Floresta Estacional Semidecidual	9,80	9,29%	9,80	9,29%	9,80	9,29%
Cerrado	15,14	14,34%	15,14	14,34%	15,14	14,34%
Campos de Altitude	36,01	34,12%	36,01	34,12%	36,01	34,12%
Mineração/Cava	44,60	42,25%	44,60	42,25%	44,60	42,25%

Tabela 16 - Evolução do uso e cobertura do solo na App de topo de morro, nos Tempos 1, 2 e 3.

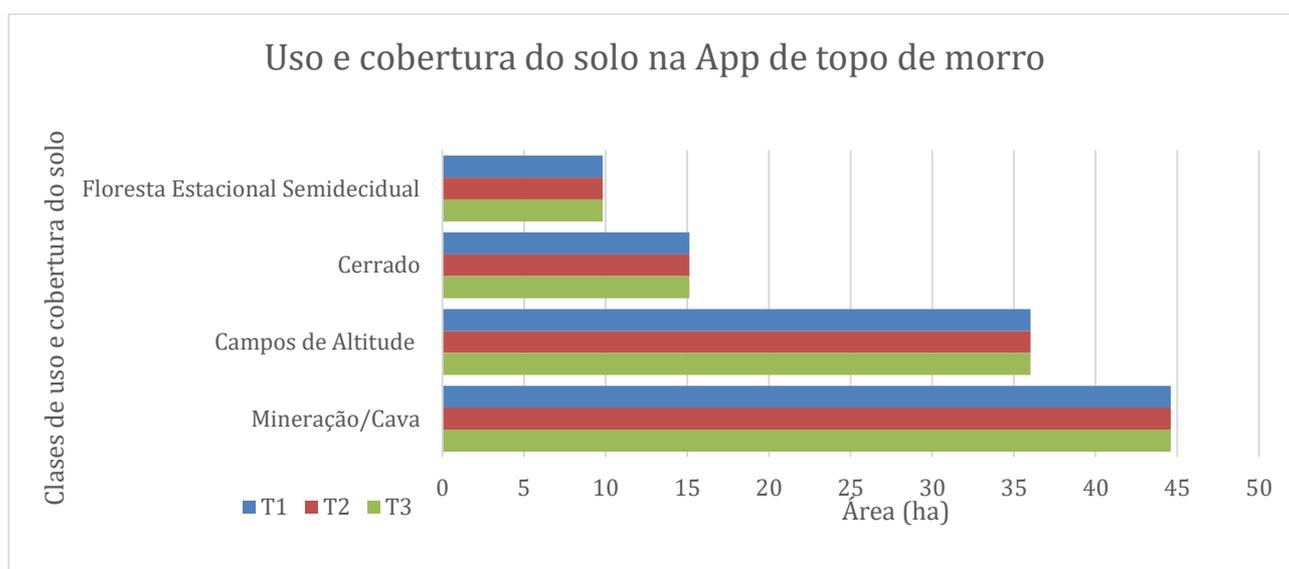


Figura 40- Evolução do uso e cobertura do solo na App de topo de morro, nos Tempos 1, 2 e 3.

Em relação as APPs de hidrografia, é esperado alterações, visto que a lama correu pelo vale, atingindo diretamente grande parte das APPs mapeadas. Este efeito causou redução de áreas de vegetação natural de cerca 70% para 58% de floresta estacional semidecidual e de 6,4% para 4% de cerrado entre T1 e T3 (Tabela 17 e Figura 41).



App Hidrografia						
Uso e cobertura do solo	Tempo 1		Tempo 2		Tempo 3	
	Área total (ha)	Área relativa (%)	Área total (ha)	Área relativa (%)	Área total (ha)	Área relativa (%)
Floresta Estacional Semidecidual	377,15	69,33%	318,75	58,60%	319,92	58,81%
Cerrado	35,00	6,43%	24,04	4,42%	21,75	4,00%
Campos de Altitude	0,02	0,00%	0,02	0,00%	0,02	0,00%
Vegetação Degradada	17,40	3,20%	14,39	2,65%	11,79	2,17%
Unidade Rural	30,55	5,62%	23,69	4,36%	20,13	3,70%
Galpões	0,04	0,01%	0,04	0,01%	0,04	0,01%
Tanques e Açudes	4,20	0,77%	2,52	0,46%	2,34	0,43%
Área de Cultivo	2,58	0,47%	1,05	0,19%	0,92	0,17%
Pastagem	23,46	4,31%	21,60	3,97%	21,59	3,97%
Pastagem Degradada	0,93	0,17%	0,93	0,17%	1,78	0,33%
Manchas Urbanas/Povoados	12,50	2,30%	10,63	1,95%	10,91	2,01%
Mineração/Cava	12,22	2,25%	10,96	2,01%	7,76	1,43%
Escritórios e Sede Social	0,50	0,09%	0,23	0,04%	0,21	0,04%
Área de Manutenção de Equipamentos	0,43	0,08%	0,43	0,08%	0,43	0,08%
Barragens de Rejeito	6,10	1,12%	0,00	0,00%	0,00	0,00%
Espalhamento da Lama	0,00	0,00%	96,61	17,76%	0,00	0,00%
Lama e Obras de Recuperação	0,00	0,00%	0,00	0,00%	105,35	19,37%
Estação de Tratam. de Águas Fluviais - ETAF	0,00	0,00%	0,00	0,00%	0,30	0,05%
Barragens de Água	9,00	1,66%	5,51	1,01%	5,53	1,02%
Rio Paraopeba	11,90	2,19%	12,58	2,31%	13,21	2,43%

Tabela 17 - Evolução do uso e cobertura do solo na App de hidrografia, nos Tempos 1, 2 e 3.



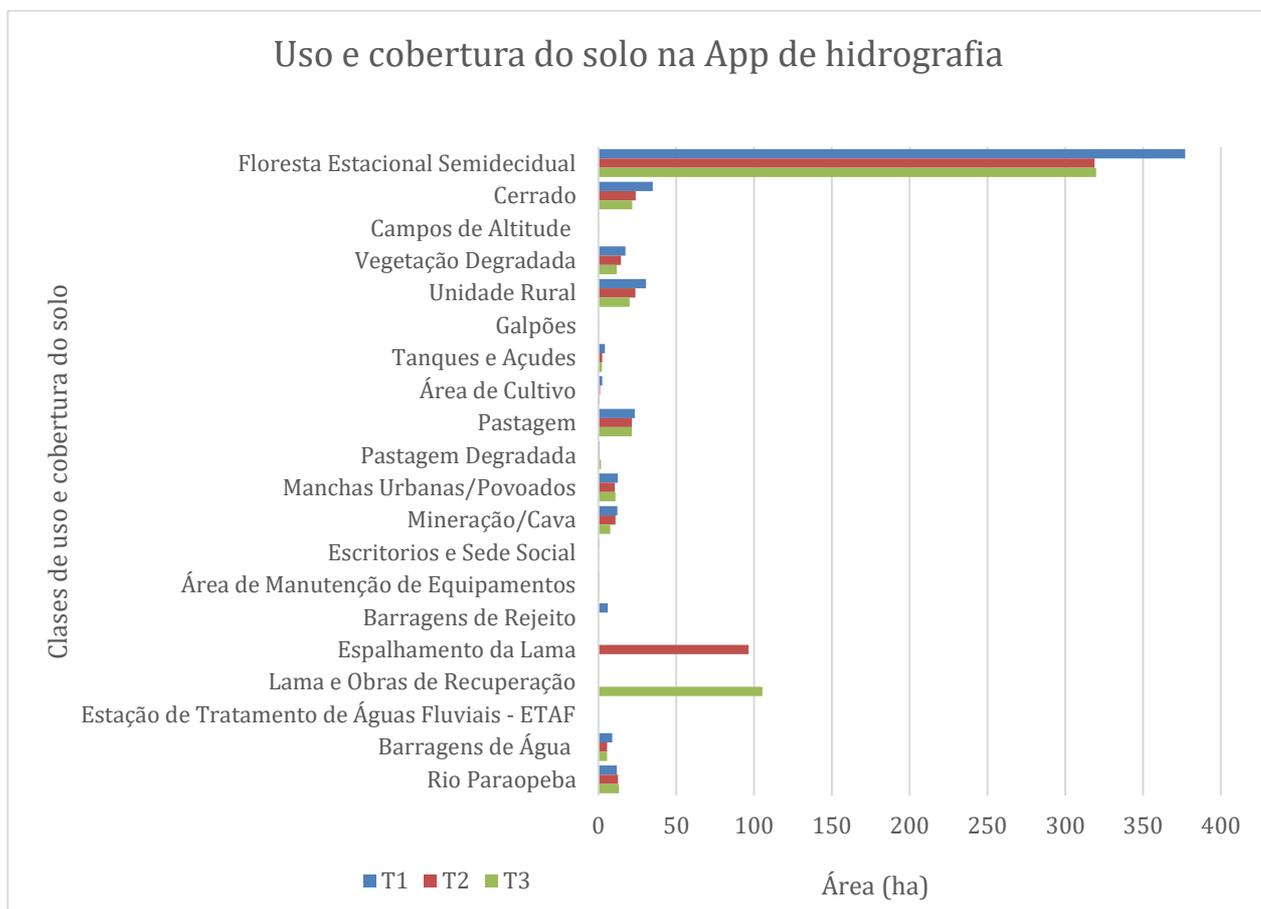


Figura 41- Evolução do uso e cobertura do solo na App de hidrografia, nos Tempos 1, 2 e 3.

5.4. Transição no uso e cobertura do solo dentro das APPs identificadas

Em relação à transição do uso e cobertura do solo dentro das APPs, as maiores transformações entre T1 e T2 estão relacionadas a mudança dos diversos usos, sobretudo das classes floresta estacional semidecidual e cerrado para a classe espalhamento da lama (Tabela 18). Em proporções, isso significou a transformação de cerca de 16% de floresta e 32% de cerrado na APP para espalhamento de lama. Mais além, houve perda de outros usos que estavam alocados na APP, por exemplo áreas de cultivo e escritórios da mineradora, apresentados no Tabela 19.

A transição de uso na APP de hidrografia entre T2 e T3 segue a mesma tendência observada entre T1 e T2, no entanto atingindo menores extensões espaciais (Tabela 20), visto que o maior impacto ocorreu devido ao rompimento. Entre T2 e T3, além das alterações nas áreas adjacentes ao vale atingidas pelo rompimento, destacados na transformação de diversos usos e lama e obras de recuperação, houve transformações percentuais no uso remanescente de mineração/cava, que atualmente está desativada, além da perda das unidades de produção agropecuária (Tabela 21).



Projeto Brumadinho UFMG

		Uso de cobertura do solo no T2																	
		Floresta Estacional Semidecidual	Cerrado	Campos de Altitude	Vegetação Degradada	Unidade Rural	Galpões	Tanques e Açudes	Área de Cultivo	Pastagem	Pastagem Degradada	Manchas Urbanas/Povoados	Mineração/Cava	Escritórios e Sede Social	Área de Manutenção de Equipamentos	Espalhamento da Lama	Barragens de Água	Rio Paraopeba	
Uso e cobertura do solo no T1	Floresta Estacional Semidecidual	316,9724	0,056	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	59,9054	0	0,2175	
	Cerrado	0,1625	23,3474	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11,2483	0	0,2373	
	Campos de Altitude	0	0	0,0163	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Vegetação Degradada	0	0	0	14,2723	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2,0115	0	1,1115
	Unidade Rural	0,7307	0,5043	0	0,0891	23,351	0	0	0	0	0,0082	0	0	0	0	0	5,8415	0	0,0287
	Galpões	0	0	0	0	0	0,036	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Tanques e Açudes	0,0014	0	0	0	0,052	0	2,5211	0	0	0	0	0	0	0	0	1,6248	0	0
	Área de Cultivo	0	0	0	0	0,263	0	0	1,0463	0	0	0	0	0	0	0	1,2744	0	0
	Pastagem	0,0003	0	0	0	0	0	0	0	21,6005	0	0	0	0	0	0	1,6989	0	0,1615
	Pastagem Degradada	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,9252	0	0	0	0	0	0,0039	0	0
	Manchas Urbanas/Povoados	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10,6287	0	0	0	0	1,869	0	0
	Mineração/Cava	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10,9583	0	0	0	1,2589	0	0
	Escritórios e Sede Social	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,2313	0	0	0,2692	0	0
	Área de Manutenção de Equipamentos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,4254	0	0	0	0
	Barragens de Rejeito	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6,0998	0	0
	Barragens de Água	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3,4884	5,5146	0
	Rio Paraopeba	0,878	0,1352	0	0,0281	0,0263	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,014	0	10,8197

Tabela 18 - Matriz de transição 2 do uso e cobertura do solo na App de hidrografia entre os Tempos T1 e T2, em valores absolutos.



Projeto Brumadinho UFMG

		Uso de cobertura do solo no T2																	
		Floresta Estacional Semidecidual	Cerrado	Campos de Altitude	Vegetação Degradada	Unidade Rural	Galpões	Tanques e Açudes	Área de Cultivo	Pastagem	Pastagem Degradada	Manchas Urbanas/Povoados	Mineração/Cava	Escritórios e Sede Social	Área de Manutenção de Equipamentos	Espalhamento da Lama	Barragens de Água	Rio Paraopeba	
Uso e cobertura do solo no T1	Floresta Estacional Semidecidual	84,04%	0,01%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	15,88%	0%	0,06%	
	Cerrado	0,46%	66,72%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	32,14%	0%	0,68%	
	Campos de Altitude	0%	0%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	Vegetação Degradada	0%	0%	0%	82,05%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	11,56%	0%	6,39%
	Unidade Rural	2,39%	1,65%	0%	0,29%	76,43%	0%	0%	0%	0%	0,03%	0%	0%	0%	0%	0%	19,12%	0%	0,09%
	Galpões	0%	0%	0%	0%	0%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	Tanques e Açudes	0,03%	0%	0%	0%	1,24%	0%	60,04%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	38,69%	0%	0%
	Área de Cultivo	0%	0%	0%	0%	10,18%	0%	0%	40,50%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	49,32%	0%	0%
	Pastagem	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	92,07%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	7,24%	0%	0,69%
	Pastagem Degradada	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	99,58%	0%	0%	0%	0%	0%	0,42%	0%	0%
	Manchas Urbanas/Povoados	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	85,05%	0%	0%	0%	0%	14,95%	0%	0%
	Mineração/Cava	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	89,70%	0%	0%	0%	10,30%	0%	0%
	Escritórios e Sede Social	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	46,21%	0%	53,79%	0%	0%	0%
	Área de Manutenção de Equipamentos	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	0%	0%	0%	0%
	Barragens de Rejeito	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	0%	0%	0%
	Barragens de Água	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	38,75%	61,25%	0%
	Rio Paraopeba	7,38%	1,14%	0%	0,24%	0,22%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0,12%	0%	90,91%

Tabela 19 - Matriz de transição 2 do uso e cobertura do solo na App de hidrografia entre os Tempos T1 e T2, em valores percentuais de manutenção ou transformação entre T1 e T2.



Projeto Brumadinho UFMG

		Uso de cobertura do solo no T3																	
Uso e cobertura do solo no T2	Floresta Estacional Semidecidual	Cerrado	Campos de Altitude	Vegetação Degradada	Unidade Rural	Galpões	Tanques e Açudes	Área de Cultivo	Pastagem	Pastagem Degradada	Manchas Urbanas/Povoados	Mineração/Cava	Escritórios e Sede Social	Área de Manutenção de Equipamentos	Lama e Obras de Recuperação	Estação de Tratamento de Efluentes	Barragens de Água	Rio Paraopeba	
	Floresta Estacional Semidecidual	310,7469	0,5152	0	0,2447	0,815	0	0,1607	0	0,0446	0,0059	0	0,1017	0,0363	0	4,6815	0	0,2079	1,1844
Cerrado	2,1536	19,9844	0	0,6719	0,5052	0	0	0	0,0336	0	0	0	0	0	0,3296	0	0,1813	0,1833	
Campos de Altitude	0	0	0,0163	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Vegetação Degradada	1,245	0,222	0	10,2113	0,162	0	0,0709	0	0	0	0	0,2502	0	0	1,7902	0,295	0	0,1429	
Unidade Rural	0,8205	0,1247	0	0	18,0862	0	0,1379	0	0,0582	1,0754	0	0	0	0	3,3205	0	0	0,0689	
Galpões	0	0	0	0	0	0,036	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Tanques e Açudes	0,0969	0	0	0	0,1754	0	1,4356	0	0,0151	0	0,0356	0,1297	0	0	0,6328	0	0	0	
Área de Cultivo	0,025	0	0	0,0145	0	0	0	0,8542	0	0	0	0	0	0	0,1526	0	0	0	
Pastagem	0,19	0,0423	0	0	0	0	0,0032	0	21,0985	0	0	0	0	0	0,2665	0	0	0	
Pastagem Degradada	0,0423	0	0	0	0	0	0	0,0673	0,1174	0,6982	0	0	0	0	0,0082	0	0	0	
Manchas Urbanas/Povoados	0	0	0	0	0	0	0,0736	0	0	0	10,5051	0	0	0	0,05	0	0	0	
Mineração/Cava	2,6203	0,0007	0	0	0	0	0,013	0	0	0	0	7,2742	0	0	1,0501	0	0	0	
Escritórios e Sede Social	0,0597	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1716	0	0	0	0	0	
Área de Manutenção de Equipamentos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,4254	0	0	0	0	
Espalhamento da Lama	1,5027	0,0329	0	0,3424	0,3474	0	0,4478	0	0,0441	0	0,3686	0	0	0	93,0003	0	0,4927	0,0291	
Barragens de Água	0,2706	0,5951	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4,6489	0	
Rio Paraopeba	0,1453	0,2376	0	0,3027	0,0415	0	0	0	0,1778	0	0	0	0	0	0,069	0	0	11,6023	

Tabela 20 - Matriz de transição 2 do uso e cobertura do solo na App de hidrografia de estudo entre os Tempos T2 e T3, em valores absolutos.



Projeto Brumadinho UFMG

Uso de cobertura do solo no T3																			
	Floresta Estacional Semidecidual	Cerrado	Campos de Altitude	Vegetação Degradada	Unidade Rural	Galpões	Tanques e Açudes	Área de Cultivo	Pastagem	Pastagem Degradada	Manchas Urbanas/Povoados	Mineração/Cava	Escritórios e Sede Social	Área de Manutenção de Equipamentos	Lama e Obras de Recuperação	Estação de Tratamento de Águas Fluviais - ETAE	Barragens de Água	Rio Paraopeba	
Uso e cobertura do solo no T2	Floresta Estacional Semidecidual	97,49 %	0,16%	0%	0,08%	0,26%	0%	0,05%	0%	0,01%	0%	0,03%	0,01%	0%	1,47%	0%	0,07%	0,37%	
	Cerrado	8,96%	83,12 %	0%	2,79%	2,10%	0%	0%	0,14%	0%	0%	0%	0%	0%	1,37%	0%	0,75%	0,76%	
	Campos de Altitude	0%	0%	100 %	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	Vegetação Degradada	8,65%	1,54%	0%	70,96 %	1,13%	0%	0,49%	0%	0%	0%	1,74%	0%	0%	12,44 %	2,05 %	0%	0,99%	
	Unidade Rural	3,46%	0,53%	0%	0%	76,34 %	0%	0,58%	0%	0,25%	4,54%	0%	0%	0%	14,02 %	0%	0%	0,29%	
	Galpões	0%	0%	0%	0%	0%	100 %	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	Tanques e Açudes	3,84%	0%	0%	0%	6,96%	0%	56,94 %	0%	0,60%	0%	1,41%	5,14%	0%	0%	25,10 %	0%	0%	0%
	Área de Cultivo	2,39%	0%	0%	1,39%	0%	0%	81,64 %	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	14,58 %	0%	0%	0%
	Pastagem	0,88%	0,20%	0%	0%	0%	0%	0%	97,68 %	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1,23%	0%	0%	0%
	Pastagem Degradada	4,53%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	12,58 %	74,80 %	0%	0%	0%	0%	0%	0,88%	0%	0%	0%
	Manchas Urbanas/Povoados	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	98,84 %	0%	0%	0%	0,47%	0%	0%	0%
	Mineração/Cava	23,91 %	0,01%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	66,38 %	0%	0%	9,58%	0%	0%	0%
	Escritórios e Sede Social	25,81 %	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	74,19 %	0%	0%	0%	0%	0%
	Área de Manutenção de Equipamentos	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100 %	0%	0%	0%	0%
	Espalhamento da Lama	1,56%	0,03%	0%	0,35%	0,36%	0%	0,46%	0%	0,05%	0%	0,38%	0%	0%	0%	96,27 %	0%	0,51%	0,03%
	Barragens de Água	4,91%	10,79 %	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	84,30 %	0%
	Rio Paraopeba	1,16%	1,89%	0%	2,41%	0,33%	0%	0%	0%	1,41%	0%	0%	0%	0%	0%	0,55%	0%	0%	92,26 %

Tabela 21- Matriz de transição 2 do uso e cobertura do solo na App de hidrografia entre os Tempos T2 e T3, em valores percentuais de manutenção ou transformação entre T2 e T3



A representação gráfica da transição entre T1-T2-T3, apresentando o uso de cobertura simplificado (Figura 42), ilustra que dentro da APP de hidrografia, a maior parte das áreas de lama (espalhamento T2 e lama e obras de recuperação no T3) são compostas por áreas de vegetação natural. Observou-se também o aumento das estruturas urbanas, decorrentes das obras próximo aos cursos d'água.

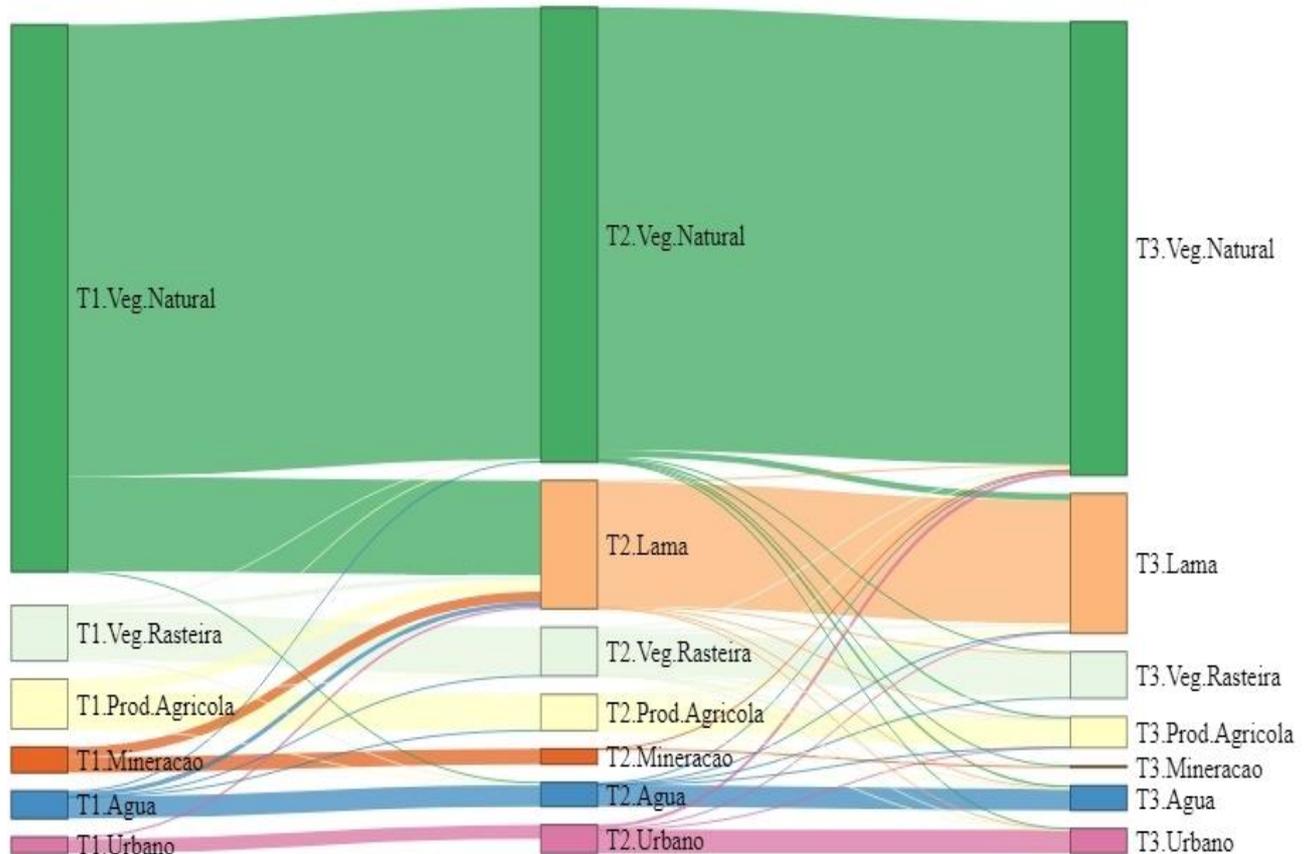


Figura 42- Diagrama de transição da cobertura do solo simplificada na App de hidrografia entre os Tempos T1, T2 e T3. Veg.Natural: Floresta estacional semidecidual, cerrado e campos de altitude; Veg.Rasteira: Vegetação degradada, pastagem e pastagem degradada; Prod.Agricola: Unidade rural, galpões, tanques e açudes, área de cultivo; Urbano: Manchas urbanas povoado, Estação de Tratamento de Resíduos Sólidos – ETRS e Estação de Tratamento de Águas Fluviais – ETAF; Mineração: Mineração/Cava; escritórios e Sede Social; Área de Manutenção de Equipamentos; Barragens de Rejeito (T1).



6. Processos e produtos complementares

Esta seção apresenta o desenvolvimento de etapas e produtos complementares ao projeto, produtos estes que não foram almejados no Chamada #2 mas que foram incorporados no escopo da proposta apresentada, tais como o *plugin*¹⁶ do classificador por *deep learning* e a extração/tabulação das métricas de paisagem a partir das classes de cobertura do solo para a área de estudo nos tempos T1, T2 e T3. Juntam-se também a esse contexto a extração dos elementos de drenagem, espelhos d'água e mancha de lama observados na cobertura aérea do drone, e também a confecção da folha cartográfica modelo a ser utilizada pelos demais subprojetos do Projeto Brumadinho UFMG.

6.1. Plugin do classificador *Deep Learning*

Como produto do projeto, foi desenvolvido um *plugin* para o *software* ArcGIS¹⁷ com o objetivo de mapear a sub-bacia do ribeirão Ferro-Carvão de forma automática a partir da classificação supervisionada de imagens de alta resolução espacial utilizando técnicas de aprendizado profundo (*deep learning*). A portabilidade do software em formato de plugin visa tornar acessível as técnicas de aprendizado de máquina e redes neurais para usuários não especializados na área. O acesso ao plugin desenvolvido pode ser feito através do acesso do repositório *online* público no *link* a seguir: https://github.com/edemir-matcomp/brumadinho_arcgis_plugin.

O repositório de acesso contém as instruções para instalações de todas as dependências necessárias para a utilização do plugin, além de um exemplo de uso para dois casos de usuários distintos: (1) O usuário que deseja apenas utilizar o modelo de aprendizado já treinado para gerar o mapeamento automático de uma nova imagem; (2) o usuário que deseja criar um novo modelo, partindo de uma imagem de treino e sua respectiva imagem de referência de classes. O material está reportado na seção 9 deste relatório – Materiais Complementares.

Para avaliação experimental do *plugin*, foi realizado o procedimento de treino, já descrito anteriormente no Relatório Parcial, utilizando as seguintes configurações: divisão das amostras

¹⁶ Ferramenta ou recurso instalado como complemento na plataforma ESRI ArcGIS.

¹⁷ ArcGIS® software by Esri. <https://www.arcgis.com>



80% para treinamento e 20% para teste. Cabe ressaltar que para otimização do processo, apenas as bandas espectrais compatíveis ao Infravermelho Próximo, Vermelho e Verde, foram utilizadas (a banda Azul foi desprezada por conter alta correlação com as demais adicionado de ruídos provocados pela alta absorção atmosférica).

Para o treinamento da rede foram utilizados os seguintes parâmetros: taxa de aprendizado de 0.001, entropia cruzado como função de perda, batch de tamanho 64 (conjuntos de 64 imagens), durante 100 épocas (iterações) usando a arquitetura *Fully Convolutional Network* (FCN). Na avaliação supervisionada foram utilizadas as seguintes 12 classes: Barragem de Rejeito, Atividade Agrícola, Vegetação Rasteira, Vegetação Arbustiva, Vegetação Arbórea, Rio Paraopeba, Outros, Mineração, Manchas Urbanas, Lama e Obras de Recuperação, ETA, Barragens de Água. Os resultados quantitativos e qualitativos, obtidos podem ser vistos na Tabela 22 e Figura 43 respectivamente.

Imagem	T1	T2	T3
Acurácia Balanceada	37,15%	26,10%	52,23%
Kappa Cohen	42,49%	44,21%	60,05%
F1-Score	22,88%	20,53%	45,90%

Tabela 22- Métricas de avaliação obtidas através da comparação entre os mapas gerados de T3, T2 e T1 pelo método utilizado e seus respectivos mapas de referência.

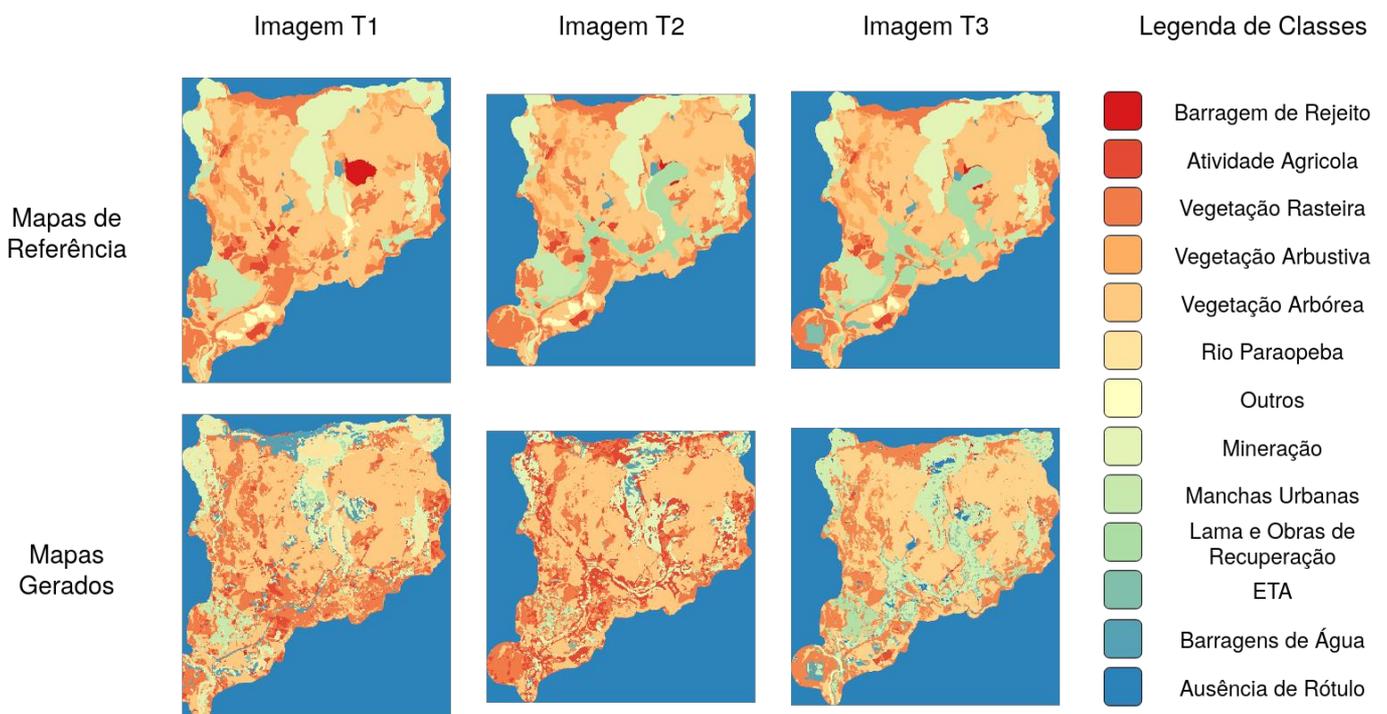


Figura 43 - Exemplos de mapas gerados automaticamente de T3, T2 e T1 utilizando o método de aprendizado profundo.



Observando os resultados na Tabela 1, podemos observar um decaimento na performance do modelo nas imagens de tempo T1 e T2 em relação a T3. A causa responsável desse fato é o fenômeno chamado *domain shift*, que ocorre devido às mudanças na aquisição e condições das imagens T2 e T3, fazendo com que o modelo treinado em T3 tenha dificuldades na interpretação e generalização na criação de novos mapas.

Um outro aspecto analisado nos resultados é o nível de confusão observado entre as classes: Barragem de Rejeito, Mineração, Lama e Obras de Recuperação, ETA, Barragens de Água. Como o mapa de referência foi montado tomando em consideração a cobertura do solo, vários pixels anotados possuem características de intensidade distintas, porém possuem o mesmo rótulo, fruto da interpretação semântica do olhar/conhecimento humano sobre a feição e o fenômeno. Assim, para amenizar o efeito de confusão foi feito um experimento onde as classes citadas anteriormente foram unidas e recalculado as métricas de avaliação. Os resultados quantitativos e qualitativos desse experimento podem ser vistos na Tabela 23 e Figura 44.

Imagem	T1	T2	T3
Acuracia Balanceada	45,64%	36,07%	61,25%
Kappa Cohen	45,39%	50,51%	70,90%
F1-Score	34,17%	32,01%	56,28%

Tabela 23- Métricas de avaliação obtidas através da comparação entre os mapas gerados pelo método utilizado e seus respectivos mapas de referência.

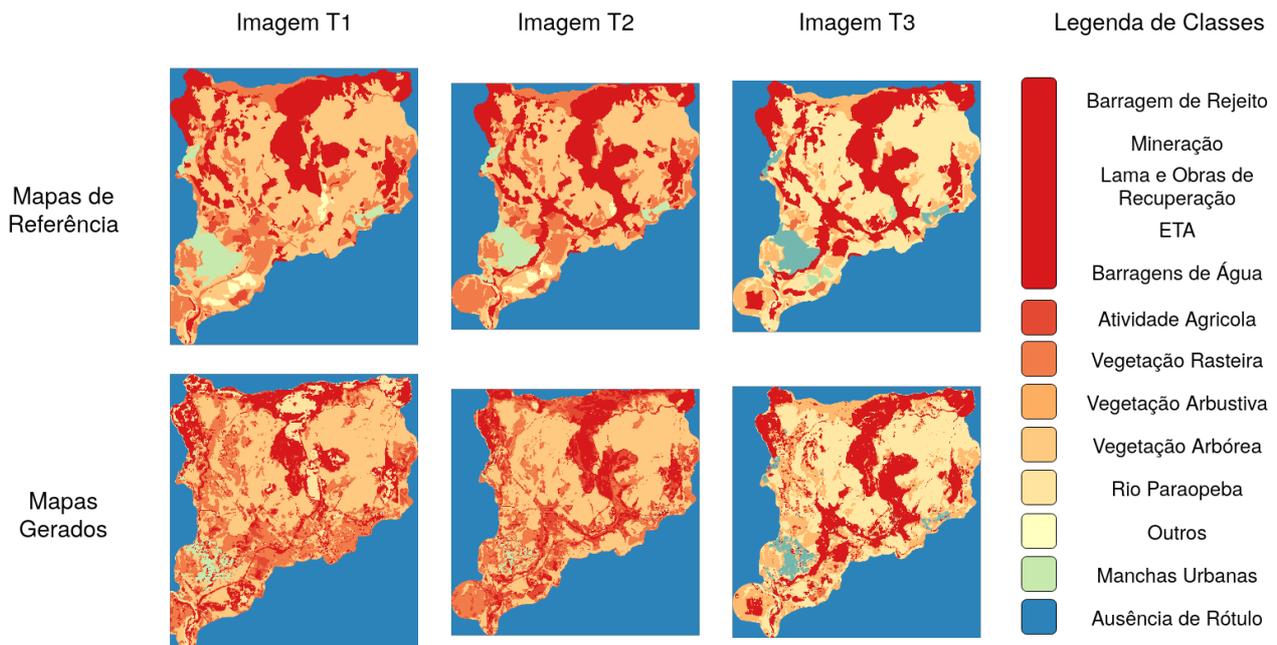


Figura 44- Exemplos de mapas gerados automaticamente utilizando o método de aprendizado profundo, juntando as classes Barragem de Rejeito, Mineração, Obras de Recuperação, ETA e Barragens de Água.



Nesse experimento, é possível observar uma melhora significativa nos resultados quantitativos e qualitativos, amenizando a rotulação de cobertura e gerando mapas visualmente mais próximos de suas respectivas referências. Em ambos os experimentos, apesar de os mapas serem gerados de forma automática, devido a algumas imperfeições e dependendo da escala de interesse, ainda se faz necessário a utilização de uma etapa de pós-processamento para que possam ser usados em termos cartográficos.

Por fim, conforme apresentado na seção 2.4 - Controle de Qualidade Temática, os resultados da classificação e cobertura do solo provenientes do plugin do deep learning foram avaliados como muito bom na área mais crítica da sub-bacia, atingindo índice $kappa = 0,756$.

6.2. Extração de métricas de paisagem

Estudos sobre a evolução das mudanças de uso e cobertura da terra são largamente conduzidas através da classificação de imagens de satélites e aplicação de conhecimentos e métricas de ecologia da paisagem (TURNER et al., 2001; LANG e BLASCHKE, 2009). A ecologia da paisagem, disciplina que estuda as relações entre o meio físico e biótico, introduziu a preocupação com os padrões da paisagem e dos seus condicionantes, estudando a estrutura, função e mudança nos elementos espaciais da paisagem (FORMAN e GODRON, 1986; TURNER et al, 2001). A ecologia da paisagem torna-se muito abrangente por envolver também as questões socioeconômicas do ambiente, onde o ser humano é visto como uma parte interativa dos ecossistemas naturais (NAVEH e LIEBERMAN, 1994).

A análise da estrutura da paisagem com ajuda de métricas pode ocorrer em três níveis: (1°) o nível da mancha (menores elementos individuais observáveis da paisagem); (2°) o nível da classe; e (3°) o nível de toda a paisagem (LANG e BLASCHKE, 2009). Métricas relativas a manchas descrevem as características geométricas de manchas individuais. Métricas relativas a classes resumem todas as manchas de uma determinada classe. O grupo de métricas específicas de classe estuda explicitamente a configuração desse conjunto de manchas. Métricas do nível da paisagem referem-se a toda a paisagem (LANG e BLASCHKE, 2009).

A análise de métricas da paisagem possuem um viés ecológico, sobretudo como indicadores biológicos e de integridade ambiental e nesse sentido, o estudo em nível de classe deve focar nas classes de vegetação natural. Dentre os parâmetros usualmente utilizados para a análise da qualidade ambiental da vegetação natural estão o tamanho, a forma, a proximidade e a



qualidade da matriz, assumindo-se que fragmentos maiores, de forma mais arredondada, conectados a outros fragmentos e imersos em uma paisagem favorável ao deslocamento das espécies possuem atributos naturais mais favoráveis à manutenção de uma parcela significativa da biodiversidade (HERRMANN, 2011). Neste estudo, como o interesse é nos atributos gerais de algumas classes, a saber (1) floresta estacional semidecidual e (2) cerrado, a extração das métricas foram executadas no nível de classe (Tabela 24). As análises foram realizadas para cada tempo (T1, T2 e T3), com a utilização do software livre Fragstats v4.2 (<https://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats.html>).

Métrica	Equação	Unidade	Descrição
Número de manchas	$NUMP = \sum n_i$	-	NUMP= Número total de manchas dentro de uma mesma classe; ni=Quantidade de manchas de uma classe.
Área média	$MPS = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{n_i}$	Hectare	MPS= Tamanho médio das manchas; aij= área da mancha i na classej; j= 1 a n número de manchas da classe.
Índice médio de forma	$MSI = \frac{\sum_{j=1}^n \frac{0,25p_{ij}}{a_{ij}} }{n_i}$	Adimensional	MSI= Índice de forma média; pij= Perímetro da mancha ij; aij= área da mancha i na classe j; j= 1 a n número de manchas; e ni= número de manchas da classe. Quanto maior o valor de MSI, mais irregular são os fragmentos.
Área núcleo média	$MCA = \sum_{j=1}^n \left(\frac{a_{ij}^c}{a_{ij}} \right)$	Hectare	MCA= Área núcleo média; j= 1 a n número de manchas; aij= área da mancha i na classe j; aij ^c = core área (m ²) da mancha ij baseado na largura da borda, em metros. Para o cálculo das áreas núcleo, foi utilizado o valor de borda de 3 metros.
Distância média do fragmento vizinho	$MNN = \frac{\sum_{i=1}^n h_{ij}}{n}$	Metros	MNN=Distância média do vizinho mais próximo; hij: menor distância do fragmento j da classe i até outro fragmento de mesma classe; n Quantidade de manchas de uma classe.

Fonte: LANG e BLASCHKE (2009).

Tabela 24- Métricas de paisagem utilizadas neste estudo.

Os resultados das análises nos 3 tempos estão ilustrados Tabela 25. Ressalta-se que as métricas de paisagem não devem ser analisadas individualmente, mas sempre dentro de um contexto, utilizando métricas de várias dimensões.



Métrica	Floresta Estacional Semidecidual			Cerrado		
	Tempo 1	Tempo 2	Tempo 3	Tempo 1	Tempo 2	Tempo 3
NUMP	107	132	103	92	137	89
MPS (Ha)	7,12	5,52	5,79	20,38	12,77	19,65
MSI	2,16	1,99	1,99	2,02	1,97	1,97
MCA (Ha)	6,67	5,17	5,38	19,60	12,26	18,90
MNN (m)	57,29	49,12	63,04	34,93	29,16	40,20

Tabela 25 - Resultados das métricas de paisagem para as classes Floresta Estacional Semidecidual e Cerrado, nos Tempos 1, 2 e 3. NUMP: número de fragmentos; MPS: área média dos fragmentos; MSI: Índice de forma de média dos fragmentos; MCA: Área "núcleo" média dos fragmentos; MNN: Distância média do vizinho mais próximo entre os fragmentos.

O número de fragmentos tanto de floresta estacional semidecidual quanto de cerrado aumentou entre o T1 e o T2 (Figura 45), pois como observado nos mapas de uso e cobertura do solo (Figura 25), o espalhamento da lama afetou os fragmentos de vegetação natural, sobretudo os localizados às margens do ribeirão Ferro-Carvão. Nesse sentido, houve subdivisão dos fragmentos de vegetação após o rompimento da barragem e redução de suas áreas (Figura 46). Em relação ao T3, as constantes modificações vêm afetando o número de fragmentos.

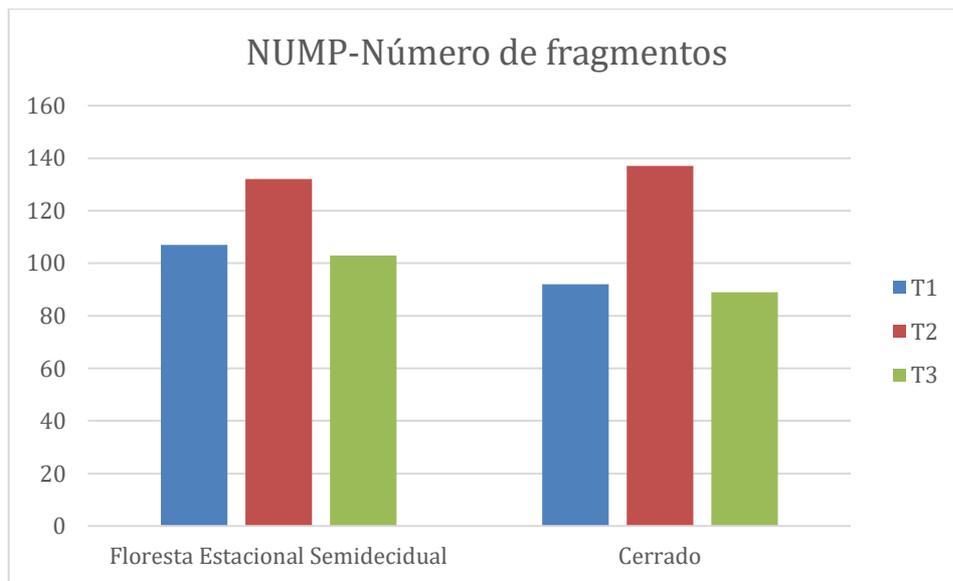


Figura 45 - Evolução da métrica NUMP para as classes Floresta Estacional Semidecidual e Cerrado nos Tempos 1, 2 e 3.



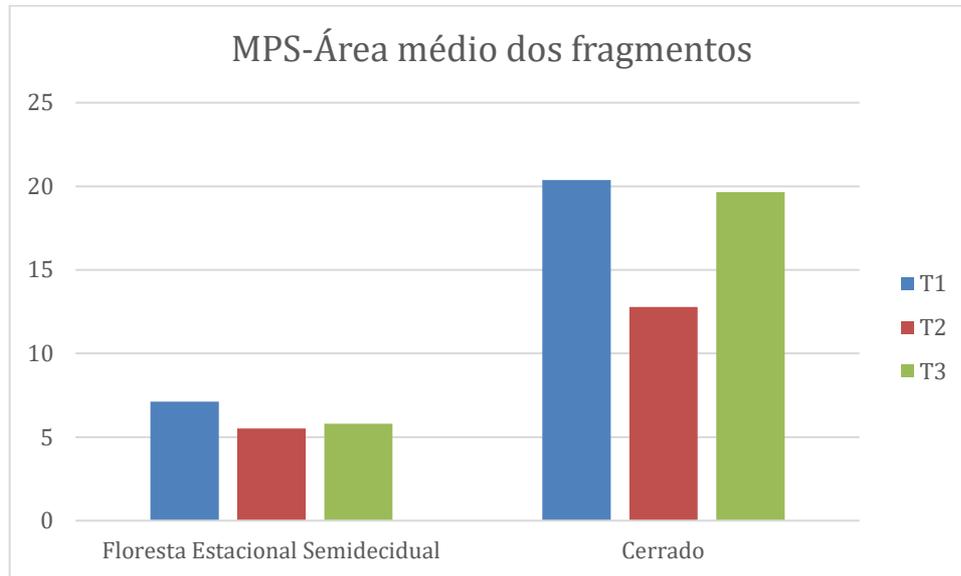


Figura 46- Evolução da métrica MPS para as classes Floresta Estacional Semidecidual e Cerrado, nos Tempos 1, 2 e 3.

O índice de forma média dos fragmentos, que indica a complexidade das formas, também se alterou entre o T1 e T2 (Figura 47). Os resultados indicam que entre o T1 e T2 os fragmentos de floresta estacional semidecidual e de cerrado no geral ficaram mais arredondados. No T3, as formas voltam a ficar mais complexas, visto que a área a bacia passa por várias intervenções.

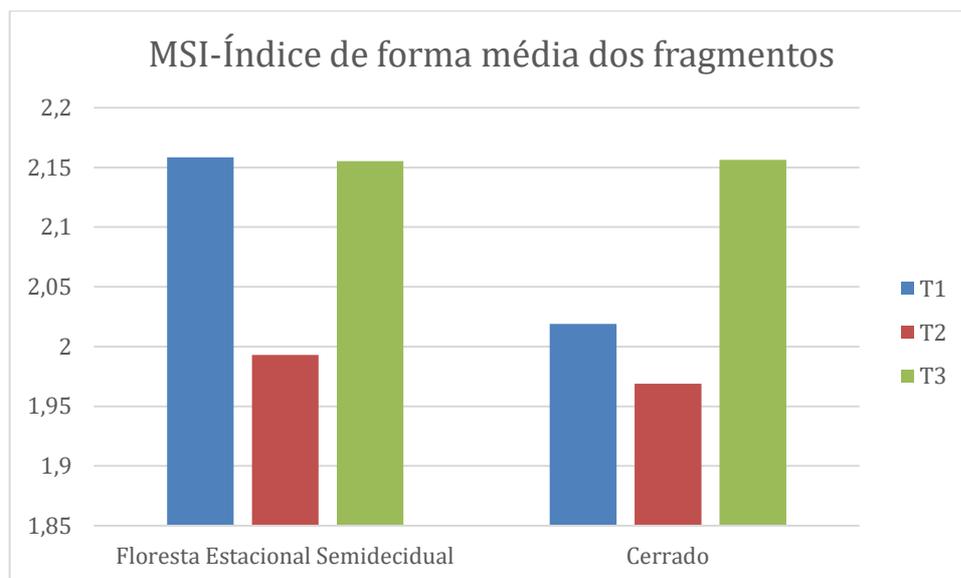


Figura 47 - Evolução da métrica MSI para as classes Floresta Estacional Semidecidual e Cerrado, nos Tempos 1, 2 e 3.

A área núcleo média dos fragmentos, que é a área excluindo as bordas, também diminuiu entre o T1 e T2 (Figura 48), em consequência do espalhamento da lama. No T3, a área núcleo vem aumentando, com destaque nas áreas de cerrado, que no geral foram menos afetadas pelo rompimento.



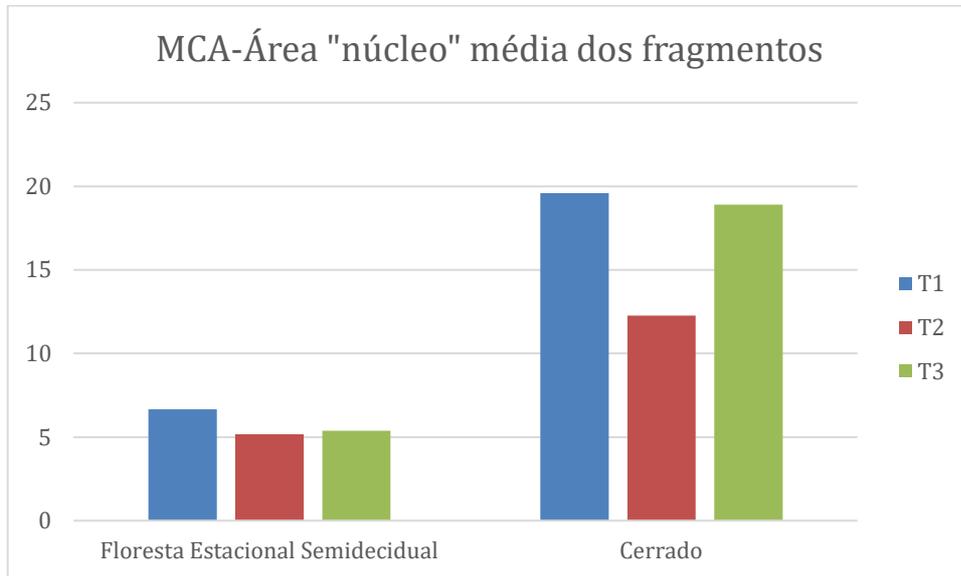


Figura 48- Evolução da métrica MCA para as classes Floresta Estacional Semidecidual e Cerrado, nos Tempos 1, 2 e 3.

A distância média do vizinho mais próximo mostra que, na média, os distância dos fragmentos ficou mais curta entre T1 e T2 (Figura 49). Como a análise leva em consideração toda a bacia hidrográfica, no geral a distância média diminuiu devido ao soterramento dos fragmentos próximos ao vale – mais distantes das partes altas da bacia. No T3, a distância voltou a aumentar, pois foi observado a presença de novos fragmentos nas áreas de obras.

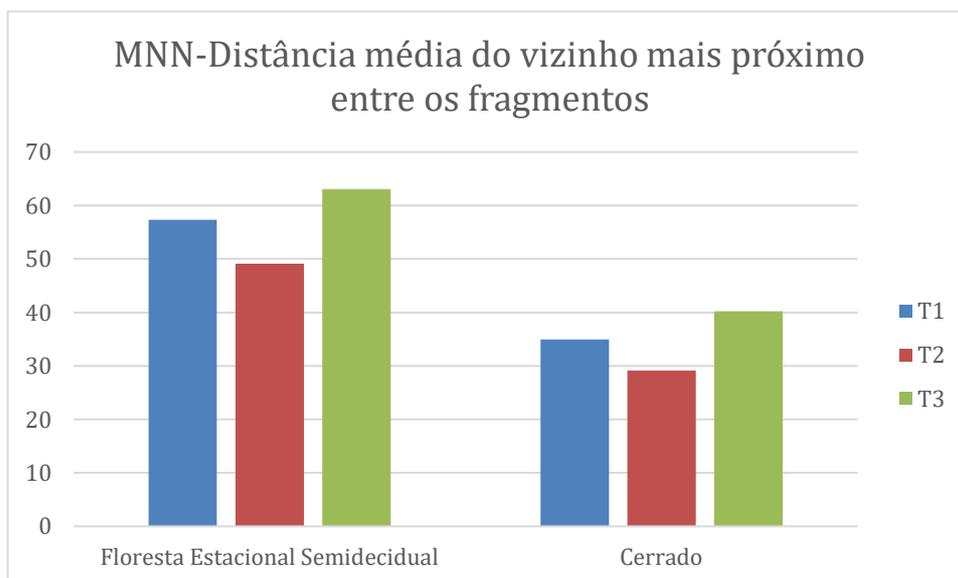


Figura 49 - Evolução da métrica MNN para as classes Floresta Estacional Semidecidual e Cerrado, nos Tempos 1, 2 e 3.



6.3. Folha cartográfica modelo

No sentido de produzir uma Folha A0 que servisse de modelo para todos os tipos de mapas construídos pela equipe, foi obtido junto à Diretoria de Serviço Geográfico (DSG) – órgão técnico normativo da Cartografia Nacional – a Folha-Modelo na escala 1:10.000 utilizada em mapeamentos sistemáticos. De posse da folha obtida foram desenvolvidas adaptações à mesma em função das atividades e do produto pretendido pela equipe. Assim, foram identificadas as coordenadas limites do mapa, calculada a convergência meridiana e a declinação magnética do centro da folha.

Em contato com o a equipe do Subprojeto 01, responsável pelo desenvolvimento da plataforma interativa do Projeto Brumadinho UFMG, foi definido o tipo de arquivo a ser disponibilizado, no caso *shapefile* e *GeoTiff*, para os mapas produzidos. Ainda em interação com o CTC, foi estabelecido uma regra de identificação dos nomes dos mapas produzidos e do selo que se encontra apostado em cada canto inferior direito dos mapas.

Em função do mapa construído foram desenvolvidas legendas próprias. Estas legendas servem para identificar os elementos mapeados na região, e por esse motivo foram construídas em função das especificidades identificadas para o mapa em questão. Neste caso, cada mapa em particular possui legendas próprias. O arquivo da Folha-Modelo (Figura 50) encontra-se em formato *.qpt (para uso na plataforma QGIS), no qual cada usuário deve indexar imagens particulares contendo as legendas desenvolvidas.



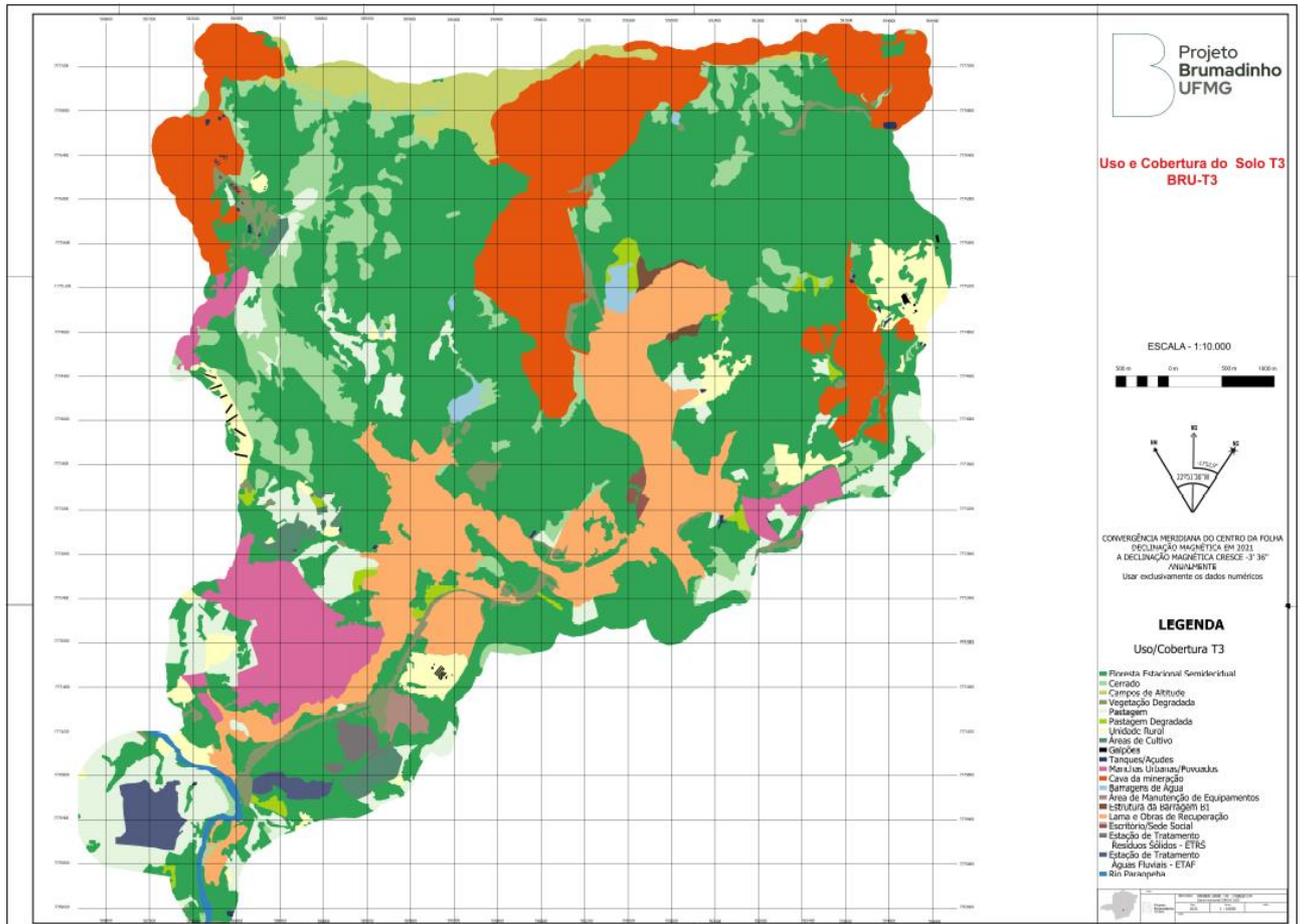


Figura 50- Ilustração da Folha-Modelo com mapeamento de Uso e Cobertura do Solo T3.

6.4. Mapeamento da drenagem, espelho d'água e mancha de lama em 2021

O delineamento das feições de hidrografia foi parte vital do escopo do subprojeto e subsidiou o mapeamento das classes de uso e ocupação do solo e também das APPs. O mapeamento das linhas de drenagem no período anterior ao rompimento da barragem B1 recorreu ao apoio do modelo digital de terreno (MDT), da imagem orbital, de cartas topográficas e de observações realizadas em campo. Conforme informado anteriormente, o MDT utilizado foi produzido por um perfilamento laser (LIDAR aerotransportado) com dados previamente filtrados para entregar um produto equivalente a superfície física terreno.

O primeiro passo foi a extração da drenagem sintética recorrendo a ferramentas de análise hidrológicas do arcGIS sobre um modelo digital de terreno hidrológicamente consistente (APP de topo de morro). Os vetores resultantes foram analisados um-a-um quanto ao contexto e



adequação com base na imagem orbital e em cartas topográficas. A Figura 51 ilustra o resultado para toda a extensão da área de estudo.

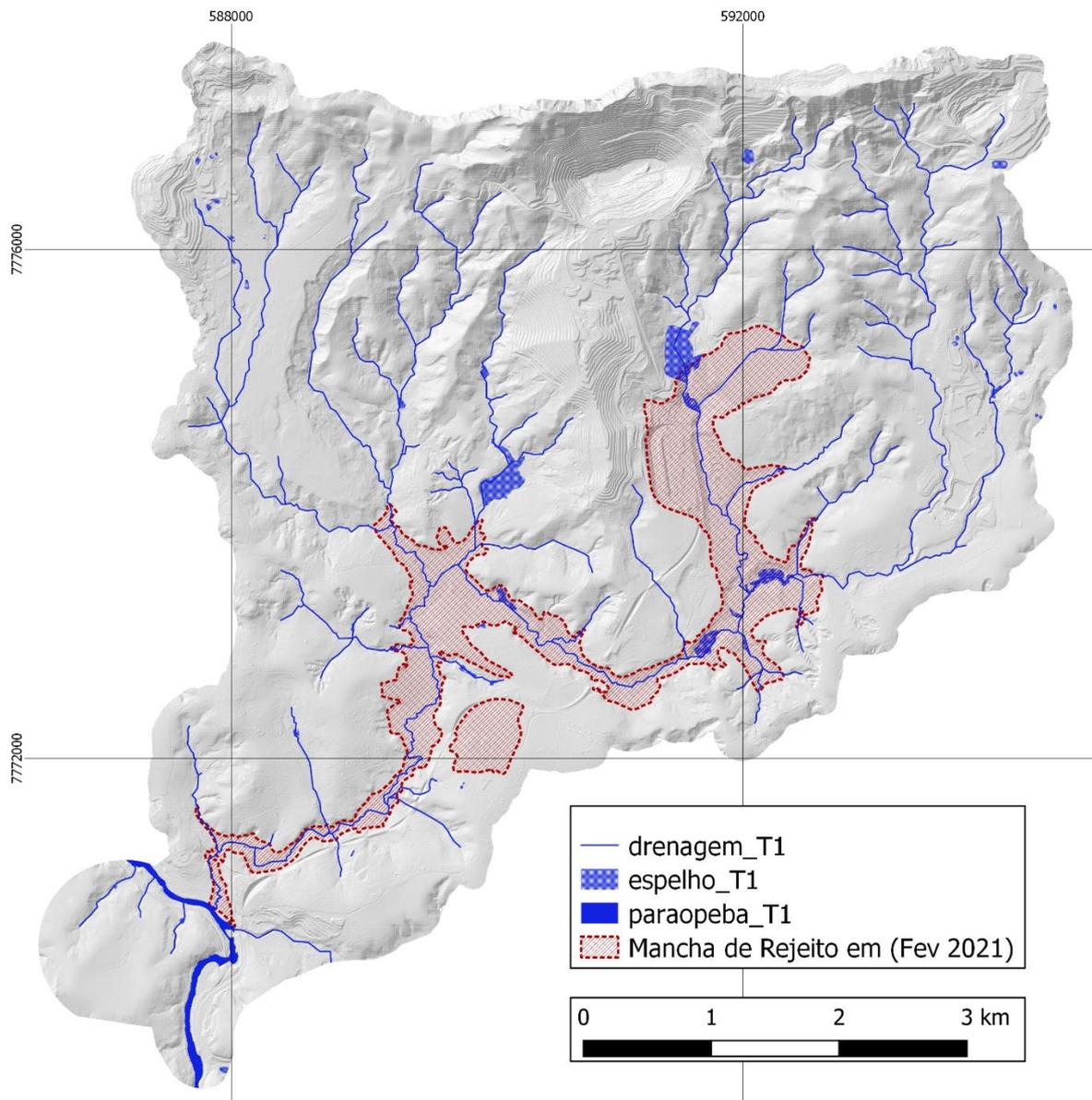


Figura 51 - Hidrografia da área de estudo representadas sobre a superfície topográfica revelando a situação dos cursos d'água e espelhos d'água antes do rompimento da barragem B1. O polígono vermelho ilustra a área onde as feições de hidrografia sofreram alteração e estão em processo de recuperação.

Cabe ressaltar que a alta qualidade do produto possibilitou a identificação de feições morfológicas locais do terreno para a vetorização das linhas de drenagem mesmo em áreas cobertas por vegetação densa. Esse recurso parece estar sendo utilizado no processo de restauração dos cursos d'água na área de estudo, como é o caso da foz do Ribeirão Ferro-Carvão no rio Paraopeba (Figura 52).





Figura 52 - Visualização da linha de drenagem para o período T1 (esquerda e centro) e período T4 (direita).

Embora todo o fundo de vale da sub-bacia esteja em obras, a situação presente já permite identificar trechos reconstituídos por canais construídos para alguns cursos d'água. A Figura 53 retrata alguns exemplos utilizando imageamento por drone, cujos dados (mosaico ortorretificado e modelo digital de superfície, descritos na seção 3.3, página 24) foram utilizados como base para a interpretação e vetorização manual dos cursos d'água e espelhos d'água da área diretamente atingida pela lama de rejeitos e área de depósito/inspeção de rejeitos. A Figura 54 apresenta um comparativo da situação das feições de hidrografia antes (T1) e depois (T2). Contudo, é importante considerar que o mapeamento da hidrografia na área atingida somente poderá ser concluído com êxito após a conclusão das obras.



Figura 53 - Perspectivas sintéticas mostrando a situação das obras de recuperação e remodelagem dos cursos d'água e adjacências produzidas a partir de dados capturados por drone em fevereiro de 2021.



Projeto Brumadinho UFMG

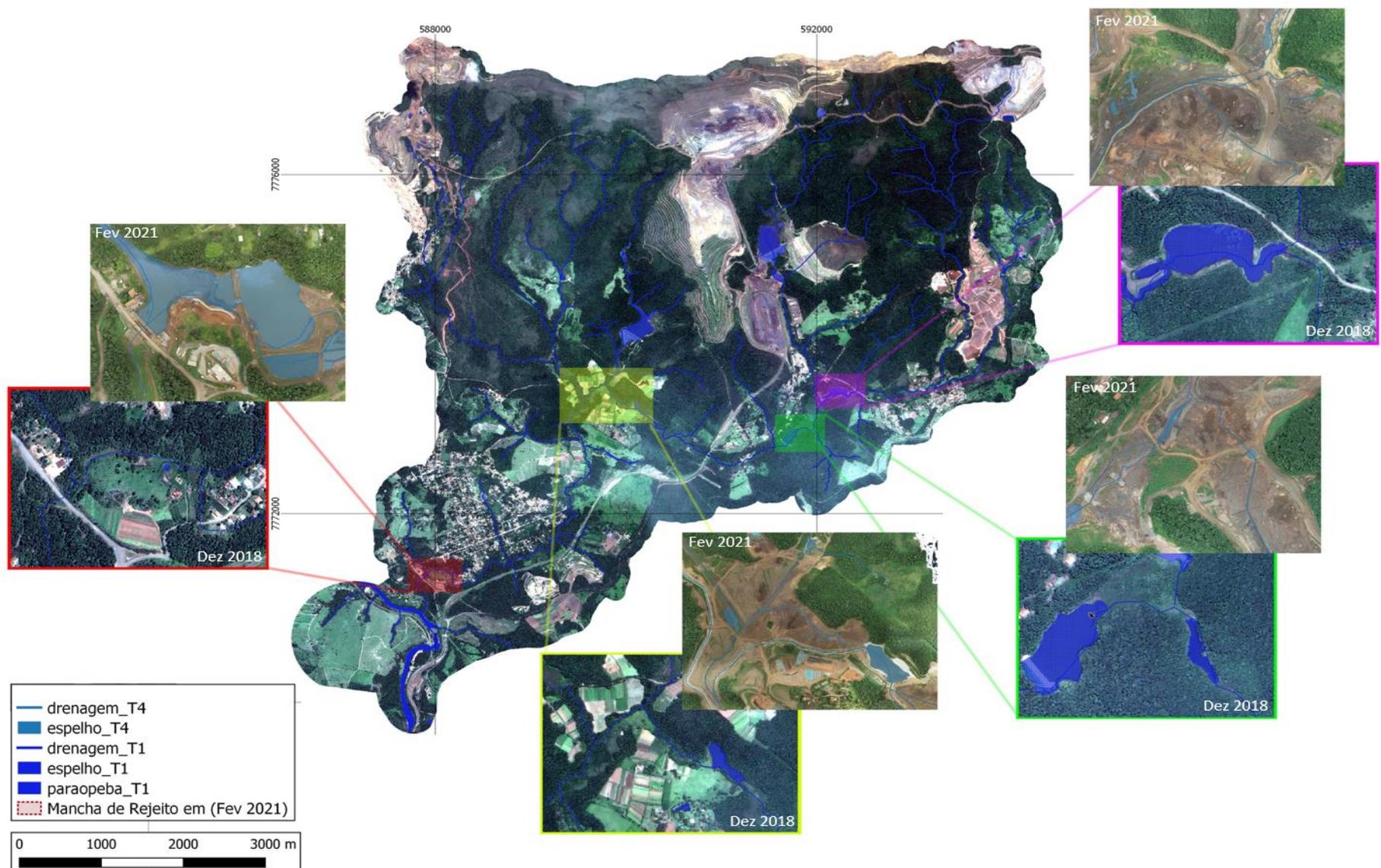


Figura 54 - Quadro comparativo ilustrando a situação dos cursos e espelhos d'água nos períodos T1 (dezembro/2018) e T4 (fevereiro/2021) em 4 áreas distintas da sub-bacia..



7. Síntese dos produtos entregues

Os produtos foram disponibilizados seguindo orientação do Subgrupo 01 do Projeto Brumadinho, tendo como princípios gerais internacionais conhecidos como Open Science:

- Open Access (acesso aberto)
- Open Data (abertura de dados, especificações, modelos e experimentos)
- Open Computational Process (abertura de código-fonte)
- Os produtos foram divididos em dois agrupamentos:
- Dados Não Estruturados (DNE)
- Dados Estruturados (DE)

Os Dados Não Estruturados (DNE) possuem a característica de ser um texto livre. Neste caso, são disponibilizados no formato PDF não escaneado e, sim, convertido para viabilizar a extração do conteúdo textual visando indexação.

De modo a permitir uma associação de um conjunto de dados descritivos (metadados) de cada arquivo DNE produzido, foi criado um arquivo tabular (Metadados_DNE.CSV) contendo os seguintes atributos:

- Título
- Data de produção
- Autor(es)
- Proveniência (identificação do subprojeto)
- Resumo
- Descrição simplificada (linguagem não técnica)
- Nomes de localidades associadas ao documento
- Palavras-chave



- Tema, categoria, subcategoria

Os Dados Estruturados (DE), entretanto, são dados codificados de acordo com os padrões usuais de bancos de dados geográficos ou convencionais. Assim, são disponibilizados no formato SHP, GeoTIFF ou CSV.

De modo a permitir uma associação de um conjunto de dados descritivos (metadados) de cada arquivo DE produzido, foi criado um arquivo tabular (Metadados_DE.CSV) contendo os seguintes atributos:

- Título
- Data de produção
- Autor(es)
- Identificação do subprojeto
- Descrição, incorporando dicionário de dados
- Nome
- Descrição
- Tipo (numérico, string, data, etc...)
- Largura
- Descrição simplificada (linguagem não técnica)
- Extensão geográfica (bounding box da área)
- Sistema de referência geográfica
- Palavras-chave
- Tema, categoria, subcategoria.



8. Sinergia com subprojetos de outras chamadas

O subprojeto 2 tem atuado a frente de outros subprojetos e, de forma coordenada pelo CTC, vem provendo dados, informações e produtos para subsidiar e otimizar o processo. Dentre os principais pontos, destacam-se:

- Imagens orbitais pós-processadas para planejamento e apoio aos subprojetos 58 e 60;
- Modelos digitais de terreno pós-processados para planejamento e apoio ao subprojeto 60;
- Produtos do voo de cobertura por drone (mosaico ortorretificado e modelo digital de superfície) para planejamento de operações dos subprojetos 58 e 60;
- Delimitação precisa da sub-bacia calculado a partir do modelo digital de terreno;
- Arquivo digital das classes de ocupação e uso do solo para o sub-projeto 60;
- Arquivo digital da hidrografia referente aos tempos T1 e T4 para o sub-projeto 60;
- Mapa de declividade para sub-projeto 60 (Figura 55).

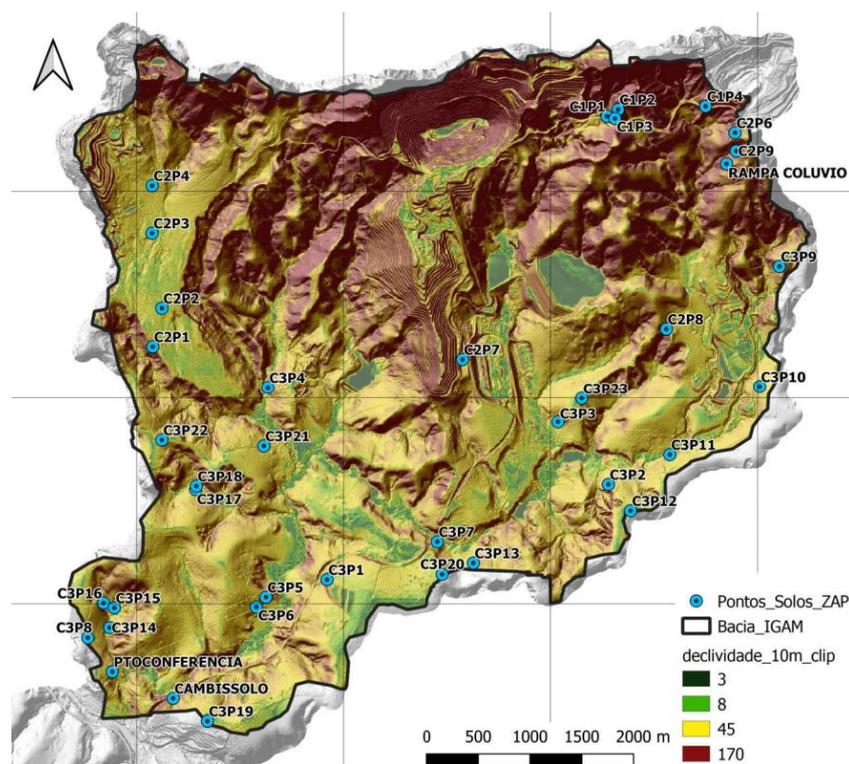


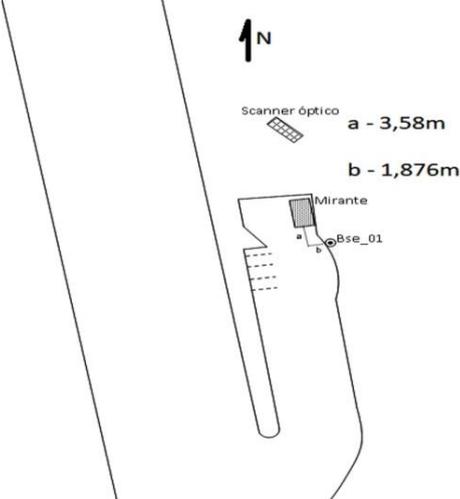
Figura 55- Exemplo de produto disponibilizado como dado de insumo para apoio de outras subprojetos coordenados pelo Comitê Técnico Científico do Projeto Brumadinho/UFMG. Mapa de declividades do terreno em classes para apoiar o planejamento e interpretação dos levantamentos de solo do subprojeto 60.

9. Material Suplementar

9.1. Monografia de marco de Levantamento GNSS

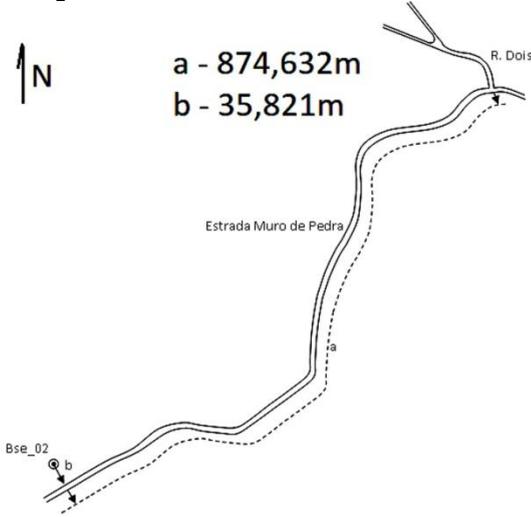
	<h1>MONOGRAFIA DO MARCO</h1>	<p>Projeto Brumadinho UFMG</p>
-----------------------------------------------------------------------------------	------------------------------	----------------------------------------

Identificação do vértice: BSE_01	Data: Janeiro/2021	Localidade: Brumadinho/ MG
Datum: SIRGAS2000 Elipsóide: GRS 80	Latitude	- 20°07'32,0802''
	Longitude	- 44°07'38,0311''
Projeção: UTM Fuso: 23 Meridiano Central: - 45°	N(m)	7.774.383,067
	E(m)	591.226,308
	Altitude elipsoidal - h (m)	886,44
Modelo Geoidal: MAPGEO2015	Altitude ortométrica - H (m)	891,93

<p>Croqui</p> 	
----------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------

<p>Descrição e Itinerário: Bse_01</p> <p>Estaca de madeira inserida na crista de pequeno talude na proximidade do mirante(desativado) instalada quase defronte às raias feitas com trilhos destinadas ao estacionamento de veículos.</p>



	<h1>MONOGRAFIA DO MARCO</h1>	<p>Projeto Brumadinho UFMG</p>
Identificação do vértice: BSE_02	Data: Janeiro/2021	Localidade: Brumadinho/ MG
Datum: SIRGAS2000 Elipsóide: GRS 80	Latitude	- 20°08'35,7500''
	Longitude	- 44°06'57,1959''
Projeção: UTM Fuso: 23 Meridiano Central: - 45°	N(m)	7.772.419,464
	E(m)	592.401,623
	Altitude elipsoidal - h (m)	849,07
Modelo Geoidal: MAPGEO2015	Altitude ortométrica - H (m)	854,49
<p>Croqui</p> 		
<p>Descrição e Itinerário: Bse_02</p> <p>Percorrer no sentido da cidade de Brumadinho aproximadamente 874,632 m na Rodovia vicinal conhecida por Estrada Muro de Pedra a partir da interseção da Rua 2 no vilarejo que abriga a Igreja de Nossa Senhora das Dores. A Bse_02 foi materializada na crista de pequeno talude afastado 35,821m da borda direita da guia da estrada.</p>		



9.2. Controle de qualidade posicional das imagens orbitais utilizadas

Tabela 26 - Análise 3 - 1:10.000 PEC-PCD Classe A - T3T1.

DifX	DifY	DifZ	(x-mediaX)^2	(y-mediay)^2	(z-mediaz)^2
-0,55	-0,11		0,109466575	0,0044446262	
-0,73	-0,07		0,260220714	0,012846023	
0,58	0,38		0,640412332	0,316024201	
-0,36	0,34		0,020686302	0,274502957	
0,15	0,32		0,131672944	0,252345785	
-0,09	-0,09		0,016890295	0,009312307	
0,13	-1,30		0,121934122	1,247531959	
-0,36	-0,08		0,020353683	0,01064824	
-0,37	-0,28		0,023381264	0,009629436	
-0,32	0,10		0,011588594	0,078400173	
-0,49	-0,26		0,076035489	0,005527878	
-0,67	0,25		0,206619642	0,186684751	
0,12	0,48		0,109983542	0,44061756	
-0,77	-0,16		0,311014047	0,000614064	
1,45	-0,86		2,77396242	0,46508266	
0,28	0,14		0,245296995	0,105865831	
0,64	-1,28		0,728893615	1,200689303	
-1,03	-0,34		0,655300503	0,024724321	
-1,01	0,09		0,636124816	0,075625164	
-0,14	-0,12		0,005705184	0,003624077	
-0,45	0,23		0,053487818	0,169620677	
0,04	-0,20		0,066922413	0,00028899	
0,58	-0,51		0,632404538	0,105423403	
-0,75	0,11		0,280926855	0,082771461	
-1,57	0,47		1,838723343	0,426278812	
-0,45	-0,02		0,053603054	0,024693077	
1,99	-0,30		4,848221224	0,013430421	
-0,35	-0,68		0,019099332	0,248611625	
-1,64	0,22		2,036795182	0,164552164	
-0,88	-0,93		0,441390598	0,56575926	
-0,48	0,24		0,06912605	0,174206322	
1,66	-0,60		3,535775042	0,175694856	
-1,29	-1,19		1,156905322	1,020261004	
-0,22	-0,18		22,13892384	7,896335023	
			0,69184137	0,246760469	
n=	33,00	DP	0,831770022	0,496749906	
Epplan=	1,70	Zcalc	-0,729625911	-0,613418924	
		Xcalc	7,660527282	2,732295856	
Ztab	1,644853627	Erro Sistemático		X	Y
Xtab	42,58474508	Preciso 1:10.000		Aprovada	Aprovada



Tabela 27- Análise 3 - 1:10.000 Tradicional (Brasil, 1984) Classe A - T3T1.

DifX	DifY	DifZ	(x-mediaX)^2	(y-mediay)^2	(z-mediaz)^2
-0,55	-0,11		0,109467	0,004446	
-0,73	-0,07		0,260221	0,012846	
0,58	0,38		0,640412	0,316024	
-0,36	0,34		0,020686	0,274503	
0,15	0,32		0,131673	0,252346	
-0,09	-0,09		0,01689	0,009312	
0,13	-1,30		0,121934	1,247532	
-0,36	-0,08		0,020354	0,010648	
-0,37	-0,28		0,023381	0,009629	
-0,32	0,10		0,011589	0,0784	
-0,49	-0,26		0,076035	0,005528	
-0,67	0,25		0,20662	0,186685	
0,12	0,48		0,109984	0,440618	
-0,77	-0,16		0,311014	0,000614	
1,45	-0,86		2,773962	0,465083	
0,28	0,14		0,245297	0,105866	
0,64	-1,28		0,728894	1,200689	
-1,03	-0,34		0,655301	0,024724	
-1,01	0,09		0,636125	0,075625	
-0,14	-0,12		0,005705	0,003624	
-0,45	0,23		0,053488	0,169621	
0,04	-0,20		0,066922	0,000289	
0,58	-0,51		0,632405	0,105423	
-0,75	0,11		0,280927	0,082771	
-1,57	0,47		1,838723	0,426279	
-0,45	-0,02		0,053603	0,024693	
1,99	-0,30		4,848221	0,01343	
-0,35	-0,68		0,019099	0,248612	
-1,64	0,22		2,036795	0,164552	
-0,88	-0,93		0,441391	0,565759	
-0,48	0,24		0,069126	0,174206	
1,66	-0,60		3,535775	0,175695	
-1,29	-1,19		1,156905	1,020261	
-0,22	-0,18		22,13892	7,896335	
			0,691841	0,24676	
n=	33,00	DP	0,83177	0,49675	
Epplan=	3,00	Zcalc	-0,41345	-0,3476	
		Xcalc	2,45988	0,877371	
Ztab	1,644854	Erro Sistemático	X	Y	
Xtab	42,58475	Preciso 1:10.000	Aprovada	Aprovada	
			Aprovada	Aprovada	



Tabela 28 - Análise 2 -1:10.000 PEC-PCD Classe A - T3T2.

DifX	DifY	DifZ	(x-mediaX)^2	(y-mediay)^2	(z-mediAZ)^2
-0,66	0,46		0,23681495	0,867918082	
-0,12	0,19		0,00262796	0,427743746	
1,65	-0,26		3,343644972	0,041624655	
-0,29	0,43		0,012890506	0,812019438	
0,46	0,28		0,398115111	0,565987207	
-0,34	0,04		0,027204004	0,26042774	
0,68	-0,34		0,732673747	0,016389431	
-1,21	0,94		1,078765496	1,995216176	
-0,73	0,00		0,305517488	0,21960584	
0,36	-1,25		0,281603895	0,603074613	
-0,62	0,21		0,198057365	0,45605874	
-0,41	-0,41		0,054166215	0,003711394	
0,41	1,24		0,346171769	2,920411712	
-0,54	-0,18		0,135082979	0,08284105	
2,07	-0,61		5,035821604	0,019566075	
0,13	-0,33		0,0943495	0,019022261	
1,64	-2,58		3,308264928	4,472289321	
-1,03	0,00		0,722731837	0,21960584	
-0,90	-0,30		0,531202445	0,028029862	
-0,47	-0,19		0,086163597	0,079141625	
1,06	-1,32		1,520692554	0,729963113	
-1,60	-0,46		2,035005997	0,000123681	
-1,26	-0,53		1,170586295	0,00366979	
0,26	-1,32		0,193128288	0,729792247	
-2,94	0,68		7,639897019	1,315198893	
-1,01	0,34		0,698622427	0,648864422	
2,03	-1,01		4,842480318	0,296130553	
1,13	-2,95		1,714695015	6,15624818	
0,29	-0,58		0,216191183	0,012449826	
0,93	-0,66		1,212120929	0,037163661	
-1,58	-1,15		1,967949863	0,460740643	
-1,57	0,00		1,939714579	0,21960584	
-1,60	-3,84		2,034150165	11,38373286	
-0,17	-0,47		44,117105	36,10436852	
			1,378659531	1,128261516	
n=	33,00	DP	1,174163332	1,062196553	
Epplan=	1,70	Zcalc	-0,590891243	-1,583543477	
		Xcalc	15,26543426	12,49286108	
				X	Y
Ztab	1,644853627	Erro Sistemático		Aprovada	Aprovada
Xtab	42,58474508	Preciso 1:10.000		Aprovada	Aprovada



Tabela 29 - Análise2 - 1:10.000 Tradicional (Brasil, 1984) Classe A - T3T2.

DifX	DifY	DifZ	(x-mediaX)^2	(y-mediay)^2	(z-mediaz)^2
-0,66	0,46		0,23681495	0,867918082	
-0,12	0,19		0,00262796	0,427743746	
1,65	-0,26		3,343644972	0,041624655	
-0,29	0,43		0,012890506	0,812019438	
0,46	0,28		0,398115111	0,565987207	
-0,34	0,04		0,027204004	0,26042774	
0,68	-0,34		0,732673747	0,016389431	
-1,21	0,94		1,078765496	1,995216176	
-0,73	0,00		0,305517488	0,21960584	
0,36	-1,25		0,281603895	0,603074613	
-0,62	0,21		0,198057365	0,45605874	
-0,41	-0,41		0,054166215	0,003711394	
0,41	1,24		0,346171769	2,920411712	
-0,54	-0,18		0,135082979	0,08284105	
2,07	-0,61		5,035821604	0,019566075	
0,13	-0,33		0,0943495	0,019022261	
1,64	-2,58		3,308264928	4,472289321	
-1,03	0,00		0,722731837	0,21960584	
-0,90	-0,30		0,531202445	0,028029862	
-0,47	-0,19		0,086163597	0,079141625	
1,06	-1,32		1,520692554	0,729963113	
-1,60	-0,46		2,035005997	0,000123681	
-1,26	-0,53		1,170586295	0,00366979	
0,26	-1,32		0,193128288	0,729792247	
-2,94	0,68		7,639897019	1,315198893	
-1,01	0,34		0,698622427	0,648864422	
2,03	-1,01		4,842480318	0,296130553	
1,13	-2,95		1,714695015	6,15624818	
0,29	-0,58		0,216191183	0,012449826	
0,93	-0,66		1,212120929	0,037163661	
-1,58	-1,15		1,967949863	0,460740643	
-1,57	0,00		1,939714579	0,21960584	
-1,60	-3,84		2,034150165	11,38373286	
-0,17	-0,47		44,117105	36,10436852	
			1,378659531	1,128261516	
n=	33,00	DP	1,174163332	1,062196553	
Epplan=	3,00	Zcalc	-0,334838371	-0,897341304	
		Xcalc	4,901900555	4,011596502	
				X	Y
Ztab	1,644853627	Erro Sistemático		Aprovada	Aprovada
Xtab	42,58474508	Preciso 1:10.000		Aprovada	Aprovada



Tabela 30 - Análise-1:10.000 PEC-PCD Classe A - T3 pontos de controle GNSS.

DifE	DifN	(E-mediaE)^2	(N-mediaN)^2
-3,18	-0,40	8,355597266	0,790093317
-2,10	-0,18	3,299606856	0,444971626
-1,40	2,63	1,245875651	4,554417231
-2,45	0,88	4,694281224	0,14697874
1,75	2,28	4,141782609	3,182542053
-2,37	-0,90	4,331068779	1,933300969
-0,35	0,53	0,004322537	0,001104104
-0,80	0,47	0,267034697	0,000677141
-0,11	0,55	0,030818505	0,003476053
0,09	0,80	0,140179104	0,094033036
2,65	3,77	8,632578515	10,76980472
-2,04	1,80	3,087867816	1,69840339
-1,50	2,84	1,465799333	5,50323773
2,45	-0,18	7,482582756	0,444971627
0,35	0,18	0,402651164	0,100439513
1,36	-0,75	2,693415993	1,534382484
0,65	-0,05	0,877324462	0,293170199
1,11	1,03	1,958026497	0,289054688
-0,08	0,77	0,043396389	0,075497489
1,40	1,23	2,8391913	0,538063421
-0,60	-1,70	0,097628752	4,81259143
-0,27	1,18	0,00019572	0,478750608
-0,86	0,00	0,327142817	0,240739322
-0,37	-1,33	0,006663294	3,327566764
-0,12	0,71	0,028051895	0,04658607
-1,69	0,86	1,984542753	0,136846773
-0,94	0,16	0,432132687	0,112682362
1,60	-2,90	3,568173659	11,49597805
-0,35	0,97	0,004454094	0,224228828
-0,28	0,38	3,6E-05	0,011545918
-0,40	-0,36	0,014328808	0,721636548
-0,28	0,49	62,45675193	54,00777221
		2,081891731	1,800259074
n=	31,00	1,442876201	1,341737334
Epplan=	1,70	-0,931457501	1,611350097
		21,61133285	18,68781045
		E	N
Ztab	1,644853627	Aprovada	Aprovada
Xtab	42,58474508	Aprovada	Aprovada

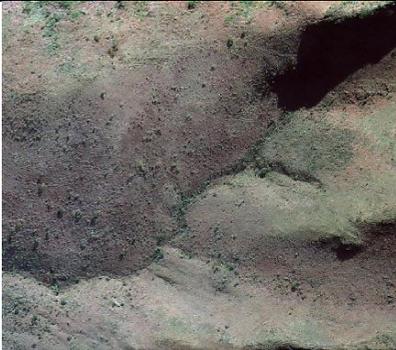


Tabela 31- Análise 1:10.000 Tradicional Classe A - T3 pontos de controle GNSS.

DifE	DifN	(E-mediaE)^2	(N-mediaN)^2
-3,18	-0,40	8,355597266	0,790093317
-2,10	-0,18	3,299606856	0,444971626
-1,40	2,63	1,245875651	4,554417231
-2,45	0,88	4,694281224	0,14697874
1,75	2,28	4,141782609	3,182542053
-2,37	-0,90	4,331068779	1,933300969
-0,35	0,53	0,004322537	0,001104104
-0,80	0,47	0,267034697	0,000677141
-0,11	0,55	0,030818505	0,003476053
0,09	0,80	0,140179104	0,094033036
2,65	3,77	8,632578515	10,76980472
-2,04	1,80	3,087867816	1,69840339
-1,50	2,84	1,465799333	5,50323773
2,45	-0,18	7,482582756	0,444971627
0,35	0,18	0,402651164	0,100439513
1,36	-0,75	2,693415993	1,534382484
0,65	-0,05	0,877324462	0,293170199
1,11	1,03	1,958026497	0,289054688
-0,08	0,77	0,043396389	0,075497489
1,40	1,23	2,8391913	0,538063421
-0,60	-1,70	0,097628752	4,81259143
-0,27	1,18	0,00019572	0,478750608
-0,86	0,00	0,327142817	0,240739322
-0,37	-1,33	0,006663294	3,327566764
-0,12	0,71	0,028051895	0,04658607
-1,69	0,86	1,984542753	0,136846773
-0,94	0,16	0,432132687	0,112682362
1,60	-2,90	3,568173659	11,49597805
-0,35	0,97	0,004454094	0,224228828
-0,28	0,38	3,6E-05	0,011545918
-0,40	-0,36	0,014328808	0,721636548
-0,28	0,49	62,45675193	54,00777221
		2,081891731	1,800259074
n=	33,00	1,442876201	1,341737334
Epplan=	3,00	-0,527825917	0,913098388
		6,939639104	6,000863578
		E	N
Ztab	1,644853627	Aprovada	Aprovada
Xtab	42,58474508	Aprovada	Aprovada



9.3. Chave de interpretação de uso e cobertura do solo

Cobertura	Feição	Cor (RGB)	Exemplo	Observações
Elemento Meio Físico	Veg. Arbórea	49-163-84		Floresta estacional perene. Esta feição aparece na imagem na coloração verde escura com uma maior rugosidade da textura. Não apresenta forma ou padrão definidos e ocupa a maior parte da bacia do córrego Ferro-Carvão.
	Veg. Arbustiva	161-217-155		Vegetação composta por predominância de arbustos, podendo ser chamada de cerrado/campo sujo. Apresenta uma coloração na imagem com um verde mais claro do que a feição anterior, e também não apresenta forma ou padrões definidos.
	Campos de Altitude	229-245-224		As manchas de Campos de altitude estão localizadas nas partes mais altas da bacia do córrego Ferro-Carvão e possuem como predominância o extrato herbáceo em sua composição.



Projeto Brumadinho UFMG

Cobertura	Feição	Cor (RGB)	Exemplo	Observações
Infraestrutura Rural T1,T2 e T3	Pastagem			<p>As áreas de pastagem são áreas de médio porte com predominância do extrato herbáceo, possuindo alguns arbustos e/ou árvores. Possui uma forma normalmente poligonal e em algumas destas áreas pode-se observar os sulcos de seu plantio.</p>
	Pastagem Degradada			<p>As áreas de pastagem degradada possuem quase as mesmas características da anterior, porém, com marcas de sobre pastoreio (linhas brancas) ou mesmo pouca vegetação herbácea.</p>



Projeto Brumadinho UFMG

Cobertura	Feição	Cor (RGB)	Exemplo	Observações
	Unidade Rural			Esta classe foi definida como sendo um agrupamento de outras classes que seriam irrelevantes para a escala deste trabalho. A Unidade rural aqui definida, não se pressupõem que sejam os limites legais destas unidades rurais (também chamados de chácaras, sítios, pousadas, etc.). Aqui ela é composta por casas, currais, pequenos pastos, açudes, árvores, etc.
	Tanques e açudes			Esta classe está inserida na classe “Unidade Rural”, mas não obrigatoriamente, pois nem todas possuem açudes ou tanques. Normalmente os açudes se apresentam em forma linear (acompanhando o fundo dos vales) ou em formas circulares ou poligonais (no caso de tanques). Para a composição colorida ao lado, sua cor pode variar do verde escuro ao claro, e às vezes podendo adquirir tons azulados também.
	Galpões			Normalmente possuem formas poligonais retangulares ou quadradas e estão, em grande parte associadas à avicultura.



Projeto Brumadinho UFMG

Cobertura	Feição	Cor (RGB)	Exemplo	Observações
	Vegetação Degradada			A classe de vegetação degradada é composta pela vegetação à beira de estradas e ferrovias às vezes com cores mais amarronzadas na imagem, ou mesmo áreas de culturas ou pastagens que foram abandonadas (neste caso algumas das características das pastagens podem ser observadas, como forma e padrão interno das manchas)
	Atividade Agrícola	255-255-191		Campos cultivados principalmente formados por horticultura, com uma textura mais lisa e fruticultura, com uma textura um pouco mais rugosa, mas com predominância herbácea e com padrões lineares bem nítidos. Existência de áreas de solo nu, quando do preparo da terra, mas com os padrões acima bem nítidos na imagem.
Infraestrutura Urbana (T1/T2/T3)	Área Urbana	150-150-150		Cidade/Vila/Distrito. É uma classe que não possui forma definida, mas possui um padrão interno quadriculado, formado muitas vezes pelo arruamento e alinhamento das casas. Pode possuir em seu interior áreas de vegetação arbórea ou mesmo rasteira.



Projeto Brumadinho UFMG

Cobertura	Feição	Cor (RGB)	Exemplo	Observações
Extrativismo Mineral (T1/T2/T3)	Mineração	230-85-13		Feição composta de cava, taludes, água, solo nu, etc. Esta classe é composta tanto pela cava, bem como outros tipos de áreas de extração. Normalmente apresenta taludes
Infraestrutura de Extrativismo Mineral (T1)	Escritório e Sede Social		 	<p>Composta por grandes estruturas, tais como galpões, escritórios, refeitórios, etc. Possuem uma textura muito grosseira e normalmente o solo é asfaltado entre uma estrutura e outra (isso para T1). Estas estruturas foram destruídas após o rompimento da Barragem e só está presente desta forma em T1.</p> <p>Já para T3, esta classe possui uma outra formatação, onde algumas unidades rurais foram adquiridas pela Vale e novos escritórios, áreas de estacionamentos, restaurantes foram novamente reconstruídos.</p>



Projeto Brumadinho UFMG

Cobertura	Feição	Cor (RGB)	Exemplo	Observações
	Barragem Rejeito	254-230-206		Existente intacta em T1 e inexistente em T2 e T3 devido ao colapso da barragem. Apresenta taludes em seu barramento e no topo uma superfície de textura lisa com tonalidades escuras, o que pode representar a presença de humidade ou água.
Mancha Derramamento (T2)	Lama	253-174-107		Derramamento de lama devido ao rompimento da barragem. Apresenta tonalidades marrons e brancas em alguns lugares. Não possui um padrão interno, mas a forma acompanha o fundo do vale do ribeirão Ferro-Carvão, até o final da bacia.
Infraestrutura De tratamento (T3)	Lama + Obras	253-174-107		Derramamento de lama devido ao rompimento da barragem e obras de recuperação do fundo do vale. Diferentemente da mancha de derramamento da lama, neste caso, pode-se observar padrões lineares bem distintos, onde a lama é movimentada e posteriormente selecionada à procura de traços de corpos.



Projeto Brumadinho UFMG

Cobertura	Feição	Cor (RGB)	Exemplo	Observações
Infraestrutura De tratamento T3	ETAF	90-180-172		Estação de Tratamento de Águas Fluviais: são estruturas de tonalidade de cinza bem escuras, com formas poligonais e padrões lineares internos compostos pelos sacos de filtragem tanto dos sedimento jogados no rio Paraopeba (ETAF2) quando do ribeirão Ferro-Carvão (ETAF1) cuja água, depois de tratada é lançada novamente no rio Paraopeba.
Infraestrutura Extrativismo Mineral (T1,T2, T3)	Barragens Água	158-202-225		Barramentos de água para utilização na mineração. Possui uma cor esverdeada nesta composição colorida de imagem, uma textura lisa e está associada a um barramento de uma tonalidade de cinza claro.
Infraestrutura de Tratamento	ETRS			Estação de Tratamento de Resíduos Sólidos: Em um primeiro momento, foi confundida com algum tipo de atividade mineradora mas, através do trabalho de campo, foi verificado que se tratava de uma área destinada ao descarte de resíduos sólidos.



9.4. Chave de interpretação para a cobertura do solo

Cobertura	Feição	Cor (RGB)	Exemplo	Observações
Elemento Meio Físico	Veg. Arbórea	49-163-84		Floresta estacional perene. Esta feição aparece na imagem na coloração verde escura com uma maior rugosidade da textura. Não apresenta forma ou padrão definidos e ocupa a maior parte da bacia do córrego Ferro-Carvão.
	Veg. Arbustiva	161-217-155		Vegetação composta por predominância de arbustos, podendo ser chamada de cerrado/campo sujo. Apresenta uma coloração na imagem com um verde mais claro do que a feição anterior, e também não apresenta forma ou padrões definidos.
	Vegetação Rasteira	229-245-224		Vegetação composta predominantemente por vegetação rasteira. Para ajudar no treinamento do “ <i>Deep Learning</i> ”, em termos de cobertura do solo foram agrupados várias classes dentro desta, tais como “ <i>Campos de Altitude</i> ”, “ <i>Pastagem</i> ”, “ <i>Pastagem Degradada</i> ”, “ <i>Unidade Rural</i> ” (Nesta classe, também foram inseridos as classes de infraestrutura rurais, tais como sedes, piscinas, galpões e currais, bem como pequenas pastagens) e “ <i>Vegetação Degradada</i> ”.



Projeto Brumadinho UFMG

Cobertura	Feição	Cor (RGB)	Exemplo	Observações
				



Projeto **Brumadinho UFMG**

Cobertura	Feição	Cor (RGB)	Exemplo	Observações
				
Infraestr. Rural T1, T2 e T3	Atividade Agrícola	255-255- 191		Campos cultivados principalmente formados por horticultura, com uma textura mais lisa e fruticultura, com uma textura um pouco mais rugosa, mas com predominância herbácea e com padrões lineares bem nítidos. Existência de áreas de solo nu, quando do preparo da terra, mas com os padrões acima bem nítidos na imagem.
Infraestr. Urbana (T1/T2/T3)	Área Urbana	150-150- 150		Cidade/Vila/Distrito. É uma classe que não possui forma definida, mas possui um padrão interno quadriculado, formado muitas vezes pelo arruamento e alinhamento das casas. Pode possuir em seu interior áreas de vegetação arbórea ou mesmo rasteira.

