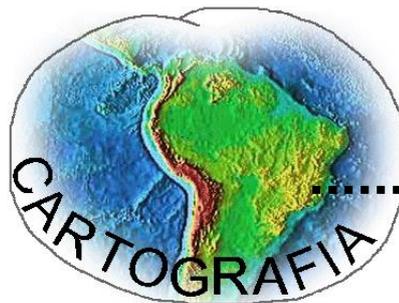


Lourdes Manresa Camargos

Geoprocessamento aplicado na
conformidade legal dos volumes de
bacias de rejeitos de mineradoras

XVI Curso de Especialização em
Geoprocessamento



UFMG

Instituto de Geociências

Departamento de Cartografia

Av. Antônio Carlos, 6627 – Pampulha

Belo Horizonte

LOURDES MANRESA CAMARGOS

**Geoprocessamento aplicado na conformidade legal dos volumes
de bacias de rejeitos de mineradoras**

Monografia apresentada como requisito parcial à
obtenção do grau de Especialista em Geoprocessamento.
Curso de Especialização em Geoprocessamento.
Departamento de Cartografia. Instituto de Geociências.
Universidade Federal de Minas Gerais.

Orientador: Marcelo Antônio Nero

Co-orientador: Paulo César Horta Rodrigues

BELO HORIZONTE
2017

C172g Camargos, Lourdes Manresa.

2017 Geoprocessamento aplicado na conformidade legal dos volumes de bacias de rejeitos de mineradoras [manuscrito] / Lourdes Manresa Camargos. – 2017.

xii, 45 f., enc.: il. (principalmente color.)

Orientador: Marcelo Antônio Nero.

Coorientador: Paulo César Horta Rodrigues.

Monografia (especialização) – Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Cartografia, 2017.

Bibliografia: f. 42-45.

1. Geoprocessamento. 2. Resíduos. 3. Minas e recursos minerais – Itabirito (MG). 4. Direito ambiental – Itabirito (MG). I. Nero, Marcelo Antonio. II. Rodrigues, Paulo César Horta. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Departamento de Cartografia. IV. Título.

CDU: 528(815.1)

Aluna: LOURDES MANRESA CAMARGOS

Monografia defendida em 5 de dezembro de 2017, pela banca examinadora constituída pelos professores:

Prof. Dr. Marcelo Antônio Nero

Prof. Dr. Plínio da Costa Temba

AGRADECIMENTOS

Aos professores do IGC, especialmente ao meu orientador Marcelo Antônio Nero.

Aos meus colegas de curso, pela companhia durante todas as aulas, troca de idéias e experiências.

Ao meu co-orientador Paulo César Horta Rodrigues, pela paciência e inspiração.

Ao Rodrigo, meu companheiro e incentivador.

RESUMO

Após o rompimento da barragem de rejeito da SAMARCO em novembro de 2015, as atenções se voltaram para a necessidade de um melhor conhecimento e controle das demais barragens. Uma das formas para se investigar eventuais irregularidades dessas estruturas, que se localizam em vales de bacias hidrográficas, é verificar se os volumes declarados pelas mineradoras para as suas bacias de rejeito realmente correspondem às informações prestadas nos respectivos processos de Licenciamento Ambiental.

Em função dos acidentes já ocorridos no Estado de Minas Gerais referentes ao rompimento de barragens de mineração e do potencial de dano ambiental e social resultantes, essa pesquisa teve como objetivo propor uma metodologia para o cálculo independente do volume de rejeitos na Barragem Maravilhas II, localizada no município de Itabirito, por meio de análise espaço-temporal, utilizando ferramentas de geoprocessamento e análise geomorfológica. Para isso, foi calculado o volume de rejeito da Barragem Maravilhas II através de subtração do MDE de 1977 (antes da construção da barragem) e do MDE atual (2017). O método de cálculo considerado mais preciso foi o de Grade Regular Retangular e, como resultado, obteve-se uma estimativa de 74.366.812,68 m³ de volume de rejeito inserido na Barragem Maravilhas II. Este resultado mostra que a barragem encontra-se em conformidade com a legislação ambiental, que prevê um volume máximo de 76.000.000 m³.

A metodologia utilizada pode ser replicada em outras barragens para que se possa ter um maior controle das estruturas e contribuir para o monitoramento destas, minimizando ou evitando possíveis impactos ambientais, sociais e econômicos causados pela atividade mineradora.

Palavras-Chave: Barragens de rejeito; Geoprocessamento; Modelos Digitais de Elevação; Legislação Ambiental.

ABSTRACT

After the breach of SAMARCO's tailings dam in November of 2015, it was made clear that a better understanding and inspection of the dams was needed. One of the ways of inspecting eventual irregularities on these structures, that are located in vales of hydrographic basins, is verifying if the mining company's declared volume of the tailings dams are according with the information given in the processes of environmental licenses.

With the social and environmental hazards caused by the breaching of the mining dams in the state of Minas Gerais in sight, this academic research offers a methodology for the independent measuring of the tailings volume on the Barragem Maravilhas II, located in the Itabirito county, through a space-time analysis, using geoprocessing tools and geomorphological analysis. For that, the volume of the tailing in the Barragem Maravilhas II was measured through subtraction of the 1977's MDE (before building the dam) and the actual (2017) MDE. The more precise method of measurement was the *Grade Regular Retangular* and as a result an evaluation of 74.366.812,68 m³ of tailings' volume in the Barragem Maravilhas II was obtained. This result shows that the dam is in conformity with the environmental legislation, which foresees a maximum volume of 76.000.000 m³.

This methodology can be replicated in other dams to have a more precise surveillance of this kind of structures, minimizing or even avoiding possible environmental, social and economic hazards due of the mining activity.

Key-words: Tailings dam; Geoprocessing; Digital Elevation Model; Environmental legislation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Superfície e malha triangular correspondente. Fonte: Namikawa, 2003.....	10
Figura 2 - -- Superfície e grade regular correspondente. Fonte: Namikawa, 2003.....	11
Figura 3--Barragem Maravilhas II.	13
Figura 4 – Diagrama da metodologia geral.	15
Figura 5 - Mapa de Localização da Barragem Maravilhas II.	16
Figura 6 - Folhas de Itabirito e Lagoa Grande.....	17
Figura 7 - Mapa de Hidrografia, Curvas de nível e Pontos Cotados de 1977 - Plambel.....	18
Figura 8 –Curvas de nível do SRTM(2000) e da PLAMBEL (1977).	19
Figura 9 - Curvas de nível do SRTM(2000) e da PLAMBEL (1977) com escala maior.	19
Figura 10 - Pontos de referência para cálculo do erro médio.	20
Figura 11 - Diagrama da metodologia TIN.	22
Figura 12 - Mapa hipsométrico 1977 (TIN).	23
Figura 13 - Cálculo 01 - TIN –Hipsometria com limite original e distância entre os pontos igual a 10 m.	24
Figura 14 - Cálculo 01 - TIN - Variação volumétrica com limite original e distância entre os pontos igual a 10 m.....	25
Figura 15 - Hipsometria com limite ajustado e distância entre os pontos de 10m.....	26
Figura 16 - Cálculo 2 - TIN – Diferença volumétrica, limite ajustado com distância entre os pontos de 10m.....	26
Figura 17 - Cálculo 3 - TIN - Limite ajustado 2 com distância entre os pontos de 1 m.	27
Figura 18 - Figura 15 - Cálculo 3 - TIN – Diferença volumétrica com limite ajustado 2 e distância entre os pontos de 1m.....	28
Figura 19 - Cálculo 4 - TIN – Hipsometria 2017 com limite ajustado 3 e distância entre os pontos de 1 m.....	29
Figura 20- Cálculo 4 - TIN – Diferença volumétrica com limite ajustado 3 e distância entre os pontos de 1 m.....	30
Figura 21 - Diagrama da Metodologia Topo to Raster.....	31
Figura 22 - Mapa Hipsométrico de 1977 (Modelo Regular Retangular).	32
Figura 23–Cálculo 5 - Topo to Raster – Hipsometria 2017 com distância entre os pontos igual a 10 m e pixel 20x20.	33

Figura 24 - Cálculo 5 - Topo to Raster – Diferença volumétrica com distância entre os pontos igual a 10 m e pixel 20x20.	34
Figura 25 - Cálculo 6 - Topo to Raster – Hipsometria 2017 com limite ajustado com distância entre os Pontos igual a 1 m e pixel 20x20.	35
Figura 26 - Cálculo 6 - Topo to Raster – Diferença volumétrica com limite ajustado com distância entre os pontos igual a 1 m e pixel 20x20.	36
Figura 27 - Cálculo 07 –Topo to raster - Hipsometria 2017 com distância entre os pontos igual a 1 m e pixel 01x01.	36
Figura 28 - Figura 25 - Cálculo 07 –Topo to raster – Diferença volumétrica com distância entre os pontos igual a 1 m e pixel 01x01.	37
Figura 29 - Variação Volume (m ³) x Tempo (ano).	39
Figura 30 - Mapa Final de Volume da Barragem Maravilhaas II.	40

LISTA DE QUADROS

Tabela 1- Critérios para classificação das barragens.....	4
Tabela 2 - Classificação de barragens.	5
Tabela 3 - Variação do erro entre os valores SRTM e PLAMBEL.....	21
Tabela 4 - Resultados TIN.....	38
Tabela 5 - Resultados Grade Regular Retangular.	38

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

APA - Área de Proteção Ambiental.

COPAM – Conselho Estadual de Política Ambiental

DNPM - Departamento Nacional de Produção Mineral.

FEAM - Fundação Estadual de Meio Ambiente de Minas Gerais.

IBAMA - Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e Recursos Renováveis.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

MDE - Modelos Digitais de Elevação.

PLAMBEL - Planejamento da Região metropolitana de Belo Horizonte.

SNISB - Sistema Nacional de informações sobre Segurança de Barragens.

TIN –Grade Irregular Triangular.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVO.....	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1 Legislação	4
3.2 Impactos sócio-ambientais da atividade mineradora	5
3.3 Geoprocessamento aplicado à análise ambiental	6
3.3.1 Uso do Sistema de Informação Geográfica (SIG) e o Sensoriamento Remoto no controle da mineração.....	7
3.3.2 Modelo Digital de Elevação aplicado no estudo de barragens	8
3.3.3 Modelo de Grade Regular Retangular e Modelo de Grade Irregular Triangular (TIN)	9
4. ÁREA DE ESTUDO	12
5. METODOLOGIA	14
5.1 Seleção da barragem de estudo	15
5.2 Obtenção das Folhas	16
5.3 Georreferenciamento das Folhas.....	17
5.4 Vetorização	17
5.5 Sobreposição das Folhas à imagem SRTM.....	18
5.6 Modelo Digital de Elevação e Cálculos	21
5.6.1 TIN	22
5.7.1 Modelo de Grade Regular Retangular.....	30
6. RESULTADOS	37
7. CONCLUSÃO	41
REFERÊNCIAS	42

1. INTRODUÇÃO

De acordo com o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM, 2014), Minas Gerais atualmente é o maior produtor de minério do Brasil, totalizando 47% da produção nacional. Essa posição de maior produtor, se aplica especialmente pela região do Quadrilátero Ferrífero, área geológica localizada entre Ouro Preto e Belo Horizonte, que atualmente abriga grandes minerações de ferro e ouro.

Segundo a Fundação Estadual de Meio Ambiente de Minas Gerais (2016), foram contabilizadas no estado 737 estruturas de barragens de mineração em 2016, distribuídas em diferentes classes de potencial de dano ambiental. Contudo, sabe-se que a mineração é responsável por promover diversos impactos ambientais e sociais como geração de áreas degradadas, poluição atmosférica, contaminação das águas, desmatamentos, erosão do solo, assoreamento dos corpos d'água, conflitos de uso do solo, depreciação de imóveis circunvizinhos, transtornos no tráfego urbano, ruídos e vibrações na vizinhança, entre outros (REZENDE, 2016).

De acordo com Barreto (2001), alguns instrumentos são utilizados para minimizar os impactos causados por atividades econômicas consideradas potencialmente poluidoras, como a mineração. Dentre estes, estão os instrumentos legais, referentes ao licenciamento ambiental, estudo e relatório de impacto ambiental, plano de controle ambiental e plano de recuperação de áreas degradadas; os instrumentos econômicos, como incentivos e caução ambiental; e, por último, os instrumentos técnicos, como desenvolvimento de novas tecnologias e parâmetros ambientais.

Além disso, a fiscalização e o monitoramento constante das barragens de mineração podem prevenir episódios como o rompimento da barragem de rejeitos do Fundão, da Mineradora Samarco, em Mariana, Minas Gerais, que causou dezenas de mortes, desemprego, danos sociais e ambientais.

Uma das formas para se investigar eventuais irregularidades dessas estruturas, que se localizam em vales de bacias hidrográficas, é pela verificação se os volumes declarados pelas mineradoras para as suas bacias de rejeito realmente correspondem às informações prestadas nos respectivos processos de Licenciamento Ambiental.

Em função dos acidentes já ocorridos no Estado de Minas Gerais referentes ao rompimento de barragens de mineração e do potencial de dano ambiental e social resultantes,

este trabalho visa propor o uso de geotecnologias como instrumento técnico de monitoramento e fiscalização do volume de rejeitos presentes nas barragens e, dessa forma, contribuir para gestão do planejamento da minimização de impactos ambientais e riscos causados pela atividade mineradora. Com as técnicas de Sensoriamento Remoto e de análise geomorfológica almeja-se elaborar uma metodologia robusta em Geoprocessamento para o cálculo independente desses volumes.

2. OBJETIVO

Essa pesquisa tem como objetivo propor uma metodologia para o cálculo independente do volume de rejeitos na Barragem Maravilhas II, através de análise espaço-temporal, utilizando ferramentas de geoprocessamento e análise geomorfológica. Com isso, o presente trabalho visa verificar a conformidade legal dessa barragem com relação ao volume de armazenamento e, dessa forma, contribuir para gestão, monitoramento e planejamento da minimização de impactos ambientais e riscos causados pela atividade mineradora.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Legislação

Segundo a Lei nº12.334 Brasil(2010), que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens, barragem tem como definição “qualquer estrutura em um curso permanente ou temporário de água para fins de contenção ou acumulação de substâncias líquidas ou de misturas de líquidos e sólidos, compreendendo o barramento e as estruturas associadas”.

A Deliberação Normativa Nº 87, de COPAM (2005), dispõe sobre critérios de classificação de barragens de contenção de rejeitos, de resíduos e de reservatório de água em empreendimentos industriais e de mineração no Estado de Minas Gerais. Segundo esta norma, o porte das barragens é determinado pela sua altura, sendo barragens com altura menor que 15 m, consideradas de porte pequeno, entre 15 m e 30 m, consideradas de porte médio e maior que 30 m de altura, consideradas de grande porte.

Além disso, as barragens são classificadas em três categorias, considerando-se o somatório dos valores (V) dos parâmetros de classificação, definidos na **Error! Reference source not found.**

Tabela 1- Critérios para classificação das barragens.

Altura da barragem H (m)	Volume do Reservatório ($\times 10^6 \text{ m}^3$)	Ocupação humana a jusante	Interesse ambiental a jusante	Instalações na área de jusante
$H < 15$ V=0	$V_r < 0,5$ V=0	Inexistente V=0	Pouco significativo V=0	Inexistente V=0
$15 < = H < = 30$ V=1	$0,5 < = V_r < = 5$ V=1	Eventual V=2	Significativo V=1	Baixa concentração V=1
$H > 30$ V=2	$V_r > 5$ V=2	Existente V=3	Elevado V=3	Alta concentração V=2
-	-	Grande V=4	-	-

Sendo assim, as barragens podem ser assim enquadradas, de acordo com a Tabela 2.

Tabela 2 - Classificação de barragens.

Tipo	Classe	Somatório dos valores
I. Baixo potencial de dano ambiental	Classe I	$V \leq 2$
II. Médio potencial de dano ambiental	Classe II	$2 < V \leq 5$
III. Alto potencial de dano ambiental	Classe III	$V > 5$

Além disso, as Deliberações Normativas COPAM nº 87 de 17 de junho de 2005 (COPAM, 2005) também estabelecem que todas as barragens devem realizar Auditoria Técnica de Segurança, elaborando um Relatório de Auditoria Técnica de Segurança de Barragem contendo no mínimo o laudo técnico sobre a segurança da estrutura, as recomendações para melhorar a segurança da barragem, nome completo do auditor com a respectiva titularidade e Anotação de Responsabilidade Técnica.

No âmbito nacional, a Lei nº 12.334 de 20 de setembro de 2010 estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (BRASIL, 2010) destinada à acumulação de água para qualquer uso, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais e cria o Sistema Nacional de informações sobre Segurança de Barragens (SNISB).

A legislação brasileira, apesar de muito ampla, sofre com deficiências que a deixam pouco ágil, como dificuldades na aquisição de materiais e meios para apurar os malefícios contra o meio ambiente. Contudo, uma alternativa viável para a deficiência na aquisição de materiais relativos ao cumprimento da legislação vigente seria o uso de técnicas de geoprocessamento (NASCIMENTO et al., 2005).

3.2 Impactos sócio-ambientais da atividade mineradora

Segundo Tonietto (2011), a mineração de ferro no Brasil representa mais de 60% do valor total da produção mineral e grande parte dessa extração ocorre no Quadrilátero Ferrífero, gerando grandes impactos ambientais e sociais nessa região.

Os principais impactos ambientais da atividade de mineração estão relacionados com a alteração de lençol de água subterrâneo, poluição sonora, visual, da água, ar e solo, impactos sobre a fauna e a flora, assoreamento, erosão, mobilização de terra, instabilidade de taludes, encostas e terrenos em geral, lançamento de fragmentos e vibrações (BARRETO, 2001).

Dentre os impactos sociais da atividade de mineração estão a desapropriação de famílias, rompimento das relações sociais cotidianas, problemas na saúde da população, problemas gerados pela migração de pessoas, entre outros. Além disso, segundo Simões (2009), a maior parte da literatura afirma que a mineração gerou crescimento econômico para

as empresas sem favorecer o desenvolvimento social das comunidades envolvidas, principalmente a longo prazo, desprezando a economia local, alterando a estrutura espacial, atraindo imigração e degradando o meio ambiente.

Em novembro de 2015, o rompimento da Barragem do Fundão que integrava o complexo minerário Germano, de responsabilidade da empresa Samarco Mineração (pertencente ao grupo Vale e BHP Billinton), trouxe consequências ambientais e sociais graves, atingindo 663,2 km de corpo d'água nos estados de Minas Gerais e Espírito Santo e liberando mais de 60 milhões de metros cúbicos de lama (IBAMA, 2015).

Segundo o Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e Recursos Renováveis - IBAMA (2015), o laudo técnico comprovou que o rompimento da barragem resultou em inúmeras consequências como: mortes de trabalhadores da empresa e moradores das comunidades afetadas, desalojamento de populações, devastação de localidades e a consequente desagregação dos vínculos sociais das comunidades, destruição de áreas de preservação permanente e vegetação nativa da Mata Atlântica, mortandade da biodiversidade aquática e fauna terrestre, interrupção do abastecimento de água, interrupção da pesca, assoreamento de cursos d'água, alteração da qualidade da água, entre outros.

Atualmente, a Serra do Gandarela é um dos últimos remanescentes físicos e naturais em bom estado de conservação presente no Quadrilátero Ferrífero. A região é de grande importância devido à existência de campos de recarga de aquíferos, devido sua morfologia heterogênea, flora com espécies de Campos, Cerrado e Mata Atlântica, remanescentes de matas primárias, além da existência de patrimônios geológicos (FONSECA, 2014).

Contudo, a Serra do Gandarela é também um grande reserva de minério de ferro, o que atrai mineradoras na região. Recentemente, o Parque do Gandarela foi criado para garantir a preservação da área, entretanto, o recorte do Parque sofre constante contestação da comunidade local.

3.3 Geoprocessamento aplicado à análise ambiental

O Geoprocessamento pode ser caracterizado como o conjunto de ferramentas e técnicas utilizadas para interpretar, analisar e compreender o espaço em diferentes perspectivas. Essas ferramentas, que podem se classificar em sensoriamento remoto ou sistemas de informações geográficas, possibilitam uma análise integrada dos sistemas naturais e garantem a otimização nos estudos dos recursos naturais, pois há maior agilidade na aquisição dos dados (MUNDIM, 2001).

O geoprocessamento é uma excelente ferramenta para o estudo de análises ambientais, pois permite a apresentação de informações espaciais e temporais de forma rápida e garantem uma visão integrada e simultânea de diversos componentes do ambiente (TUCCI, 2000). Por esse motivo, existem muitos estudos envolvendo análise ambiental com a utilização de ferramentas de geoprocessamento.

Rossi (2010) utilizou técnicas de geoprocessamento para o monitoramento de atividades de mineração em uma área de estudo localizada no estado do Rio de Janeiro. O trabalho foi desenvolvido através do processamento de imagens de satélite e aplicação de técnicas de detecção de mudanças da paisagem. Como resultado, notou-se um aumento de 6,67 vezes das áreas de mineração do ano de 2002 à 2010.

Silva (2011) identificou empreendimentos minerários localizados em Áreas de Preservação Permanente (APP) no município Santo Antônio de Pádua, através de técnicas de geoprocessamento. Foram utilizadas bases cartográficas como fotografias aéreas e cartas topográficas para o mapeamento das APPs e atividades mineradoras. Ao todo, foram encontrados 31 empreendimentos de extração e/ou beneficiamento mineral operando em APPs.

3.3.1 Uso do Sistema de Informação Geográfica (SIG) e o Sensoriamento Remoto no controle da mineração

O uso do Sistema de Informação Geográfica (SIG) e a aplicação de sensoriamento remoto e seus métodos de análise espaço-temporal são de grande utilidade no monitoramento da alteração e expansão da paisagem, além da análise de velocidade de degradação dos recursos ambientais de uma região.

Alberti (2015), utilizou sensoriamento remoto para detectar a expansão da barragem Maravilhas II, em Minas Gerais, através de subtração simples de bandas de imagens do Landsat 5 TM e análise de componentes principais. Através dessas análises, foi possível identificar áreas onde ocorreram mudanças de cobertura vegetal e regiões que caracterizaram a expansão da barragem do período de 1995 a 2014.

Sirtole (1998), utilizou as mesmas técnicas de subtração simples e análise de componentes principais, para o estudo da expansão de área de mineração em uma mina de calcário calcítico no município de Rio Branco do Sul, em um intervalo de nove anos.

Concluiu-se que as técnicas de mapeamento utilizadas foram satisfatórias para verificação e mapeamento da expansão da mineração.

Segundo Pachêco (2014), devido a constante evolução do sensoriamento remoto e à melhoria da resolução espacial geométrica e radiométrica, é possível a detecção de alvos cada vez menores.

Atualmente, novas tecnologias ligadas ao geoprocessamento estão surgindo. O mapeamento digital a laser, por exemplo, é um sistema de sensoriamento remoto ativo que permite a coleta de dados espaciais tanto da topografia do terreno, como das estruturas verticais presentes na superfície, sendo sua precisão de 15 cm na altimetria e 20 cm na planimetria (ZANDONÁ, 2005).

Outras tecnologias como RPA (Aeroave Remotamente Pilotada) ou Drone, que captam imagens da superfície terrestre através de sensores aéreos por aeronaves não tripuladas, apresentam vantagens de viabilidade técnica e econômica. As principais vantagens do sensoriamento remoto por RPAs em relação ao aerotransportado por aeronaves tripuladas e ao orbital, podem ser: redução dos custos de obtenção de imagens/ fotografia aérea, maior flexibilidade de resolução temporal para aquisição de imagens de alta resolução; possibilidade de execução de missões em situações adversas sem risco de vida para o piloto e operador de câmera aerofotogramétrica (LONGHITANO, 2010).

Junior (2011), apresentou um estudo de determinação de volume de minério estocado na mina de Alegria no município de Mariana, Minas Gerais. O cálculo de volume foi feito utilizando-se ferramentas do sensoriamento remoto como Laser Scanner Terrestre e Laser Saner Aerotransportado.

3.3.2 Modelo Digital de Elevação aplicado no estudo de barragens

Os Modelos Digitais de Elevação (MDE) são representações computacionais das formas do relevo da superfície terrestre, através do armazenamento de dados altimétricos (Salgado, 2011). De acordo com Moraes (2017), para a escolha do MDE, devem ser levados em conta diversos fatores como a precisão do produto, a escala de mapeamento, as características da áreas de aplicação, assim como os erros advindos do processo de aquisição de dados.

Na literatura existem diversos estudos que envolvem a aplicação de modelos digitais de elevação para estudos de barragens. Villaron (2011) fez um estudo para avaliar os impactos da construção de uma barragem na Bacia do Rio Una, na qual se insere a sub-bacia do rio das

Antas, um dos principais tributários do rio Paraíba do Sul. Através de modelos digitais de elevação, foi possível obter informações relevantes para o planejamento de uma possível barragem. Pôde-se concluir que a construção de uma barragem nessa localização, inundaria uma superfície de 94 há de APPs e implicaria na inundação de 165 ha de pastagens e 32 ha de florestas.

Souza (2010), descreve um método de cálculo para obtenção da capacidade volumétrica de uma futura barragem utilizando-se um modelo digital de eleva o. Neste método, após definida a posição, extensão e a altura da barragem,   necessário determinar o conjunto de pontos no terreno devido a constru o daquela barragem. Supondo que o nível máximo da água no reservatório   dado pela altura da barragem, então a capacidade do reservatório   determinada fazendo-se o somatório do volume de água que pode ser armazenado em cada célula matriz. O volume   dados pelo produto entre a área da célula vezes a diferenç  entre a altura da barragem e a eleva o do terreno naquela célula.

O presente trabalho utiliza uma metodologia similar, com a diferenç  de que a altura da barragem foi obtida através de um novo modelo digital de eleva o, representando o terreno atual da barragem, como será explicado mais   frente. Além disso, este trabalho trata-se de uma barragem de rejeitos e não de  gua.

Segundo Morais (2017), no Brasil, as principais fontes de MDEs gratuitos oriundos de sensoriamento remoto, são os modelos SRTM, ASTER GDEM e TOPODATA. As aplica es utilizando esses modelos têm ganhando destaque principalmente na área de Geociências em estudos geomorfológicos.

Segundo Valeriano (2002), embora existam Modelos Digitais de Eleva o de várias origens, os dados cartográficos constituem uma importante fonte de dados para sua constru o. A gera o de MDE a partir de dados cartográficos consiste na digitaliza o de dados topográficos como isolinhas e pontos cotados e sua posterior interpola o, sendo que as eleva es são estimadas ponto a ponto de uma grade para seu armazenamento sistemático (Salgado, 2011). No presente trabalho, a gera o do MDE antes da constru o da barragem ocorreu a partir de dados cartográficos da PLAMBEL (Planejamento da Região Metropolitana de Belo Horizonte) do ano de 1977.

3.3.3 Modelo de Grade Regular Retangular e Modelo de Grade Irregular Triangular (TIN)

No processo de geração de um modelo digital de terreno, os modelos mais comumente usados são os de grade regular retangular e os de grade irregular triangular (TIN – Triangulated Irregular Network), sendo que o ajuste de superfície envolve a definição de uma função interpolante válida para os pontos internos ao elemento básico da grade (Felgueiras, 1998).

O modelo TIN, caracteriza-se por ser uma estrutura composta por elementos triangulares, em que os vértices são pontos da amostra, havendo distintos métodos para se proceder à triangulação (Figura 1). Os vértices, representam um conjunto de localizações na superfície e normalmente incluem os que representam descontinuidades na inclinação do terreno, como picos, depressões, divisores de águas, vales e desfiladeiros (MAUNE et al., 2001).

Modelos baseados no TIN, possuem vantagens em relação a outras representações de superfície, como o fato de adaptar-se naturalmente à variação da complexidade do terreno. Sendo assim, onde houver pouca variação na superfície, somente uma pequena quantidade de pontos é amostrada e onde houver muita variação, mais dados são coletados (MAUNE et al., 2001).

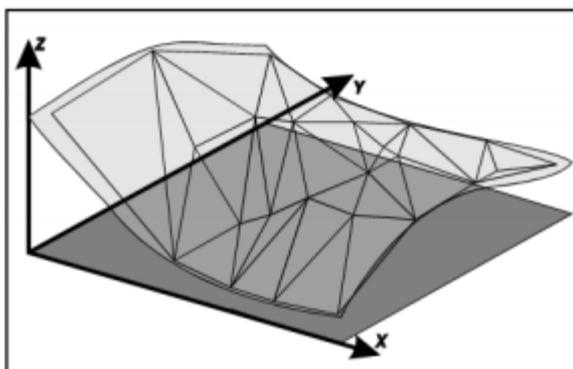


Figura 1 - Superfície e malha triangular correspondente. Fonte: Namikawa, 2003.

A Grade regular retangular (Topo to Raster), representada na Figura 2, possui uma estrutura matricial, com uma informação em cada cruzamento entre os eixos vertical e horizontal, de forma regular, sendo que o espaçamento entre duas posições da grade é constante na vertical e na horizontal (Namikawa, 2003).

O espaçamento da grade, ou seja, a resolução em X ou Y, deve ser idealmente menor ou igual a menor distância entre duas amostras com cotas diferentes. Nesta distribuição, os dados são estruturados em forma matricial, onde uma posição qualquer da matriz implica em

uma posição correspondente na malha, e armazena-se apenas o valor da cota Z do ponto (OLIVEIRA; IMAI, 2010).

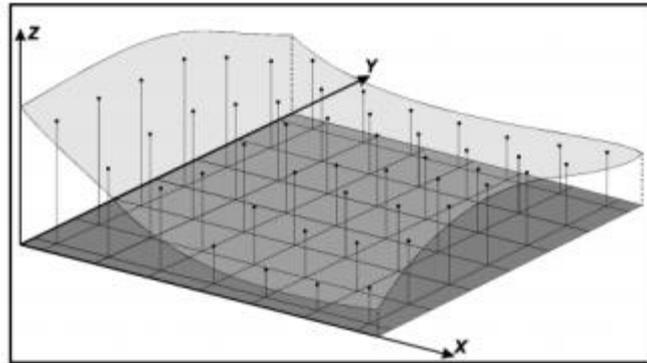


Figura 2 - – Superfície e grade regular correspondente. Fonte: Namikawa, 2003.

4 ÁREA DE ESTUDO

A barragem de contenção de rejeitos Maravilhas II está localizada na porção norte do município de Itabirito, próximo ao limite com o município de Nova Lima, no Estado de Minas Gerais e inserida no Córrego Sapecado, possuindo como contribuintes os córregos Vargem do Pico (afluente esquerdo) e Lagoinha (afluente direito). Além disso, é uma das estruturas da Mina do Pico, integrante do Complexo Itabiritos (junto às demais Minas Galinheiro, Sapecado e Fábrica) e foi construída em 1994 pela empreendedora MBR – Minerações Brasileiras Reunidas S. A.

A Mina do Pico, onde está inserida a barragem de rejeitos Maravilhas II, faz parte do Quadrilátero Ferrífero, cuja área é prioritária para conservação da biodiversidade de Minas Gerais e é classificada como “Área de Importância Biológica Especial”. Segundo Victorino (2015), as florestas e os campos dessa região são de extrema relevância para a manutenção da flora e fauna silvestre, sobretudo das espécies endêmicas, raras e ameaçadas de extinção. Por essa razão, alguns setores dessa região foram transformados em Unidades de Conservação, como a Área de Proteção Ambiental (APA) Sul da Região Metropolitana de Belo Horizonte e Unidade de Conservação Estadual do tipo Uso Sustentável, na qual a barragem de rejeitos Maravilhas II está inserida.

Na Figura 3 abaixo, é possível identificar a Barragem Maravilha II em Imagem de satélite.

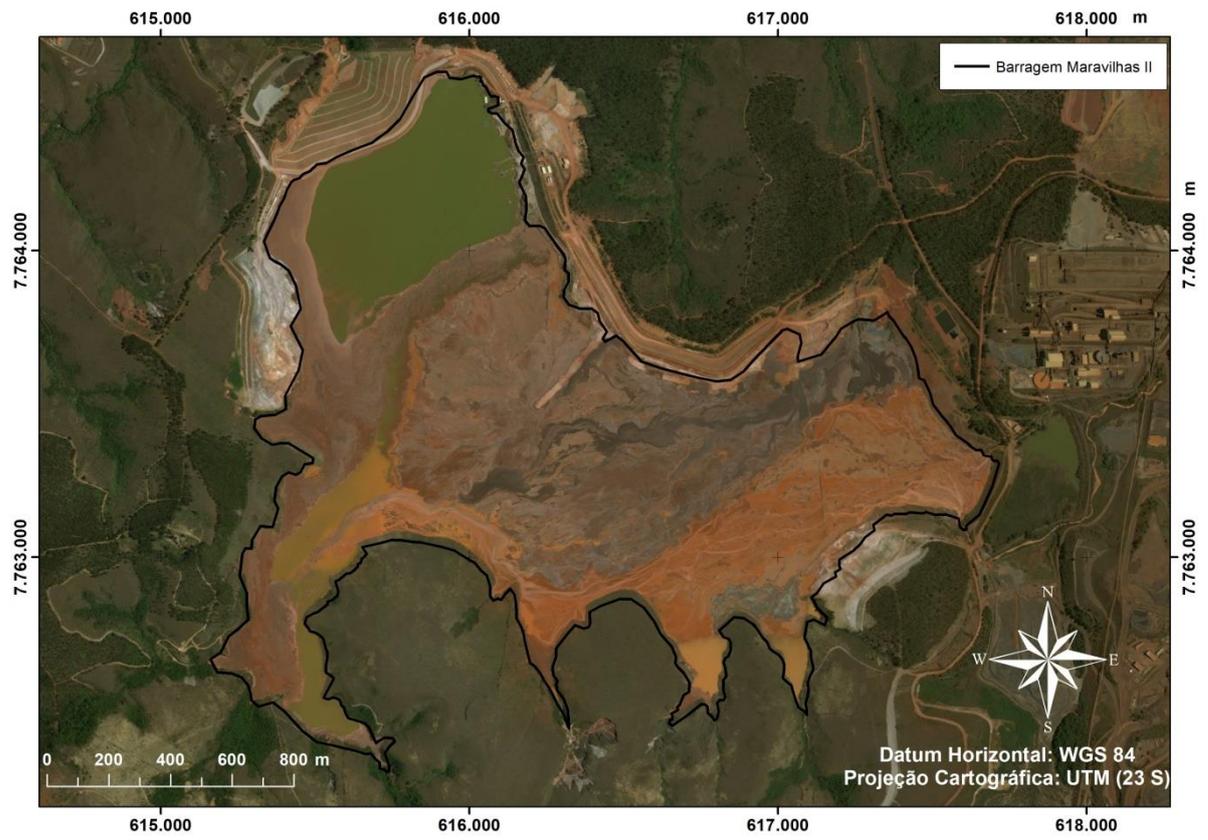


Figura 3–Barragem Maravilhas II.

5 METODOLOGIA

O presente trabalho consiste em calcular o volume de rejeito da Barragem Maravilhas II, através de subtração do MDE de 1977, ano anterior à construção da barragem, edo MDE do ano de 2017. O procedimento para determinar os modelos digitais de elevação foi realizado através domodelo de Grade Regular Retangular e modelo TIN.

O MDE de antes da construção da barragem foi obtido através de cartas topográficas de 1977 da PLAMBEL. O MDE atual, foi obtido através da determinação de um conjunto de pontos do terreno que representa a parte alagada por rejeitos. Dessa forma, supôs-se que o nível máximo de rejeito no reservatório é dado pela altura da barragem.

A partir destes dados, a capacidade do reservatório é determinada pelo produto entre a área alagada e a diferença da altura dabarragem e a elevação do terreno.

Por último, comparou-se o volume obtido com o volume declarado pela mineradora para verificar se o volume da Barragem de rejeito realmente corresponde às informações prestadas nos respectivos processos de Licenciamento Ambiental.

O Diagrama a seguir faz uma síntese da metodologia a ser utilizada no presente trabalho e nos itens seguintes, têm-se a descrição detalhada desta.

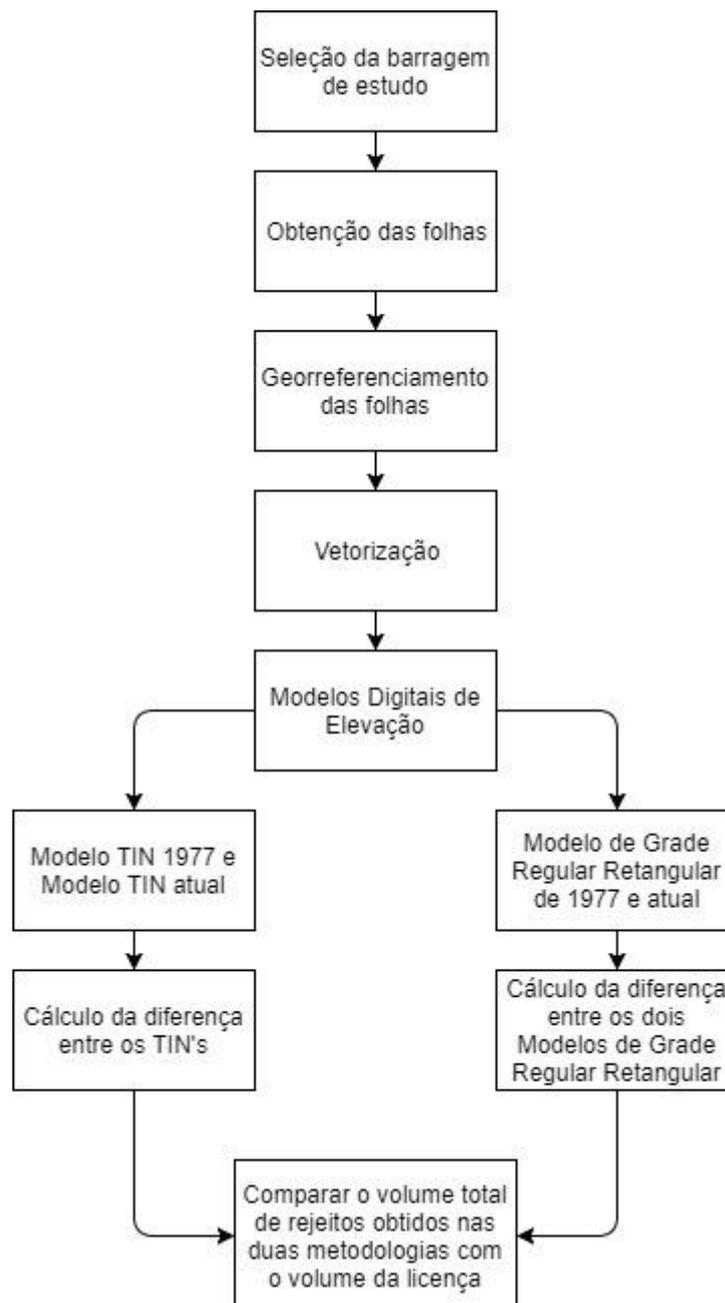


Figura 4 – Diagrama da metodologia geral.

5.1 Seleção da barragem de estudo

Para a realização deste trabalho, primeiramente foi selecionada a área que corresponde à barragem de estudo. Para isso, foram analisadas todas as barragens de mineração existentes em Minas Gerais, através do cadastro das Barragens da FEAM. Com o cadastro, foi possível obter o banco de dados das barragens desde 2008 até 2015, disponibilizado em planilhas do Excel, com informações de nome, localização, altura, volume, mineradora responsável, classificação, entre outras informações importantes referentes à todas as barragens do estado.

Para a seleção da barragem, foram utilizados os seguintes critérios:

- Barragens com maior nível de potencial de dano ambiental, ou seja, barragens inseridas na Classe III;
- Barragens com maior tamanho;
- Barragens localizadas no Quadrilátero Ferrífero.

Após análises dos critérios, foi selecionado como local de pesquisa, a Barragem de rejeitos Maravilhas II, como pode ser visualizado na Figura 5.

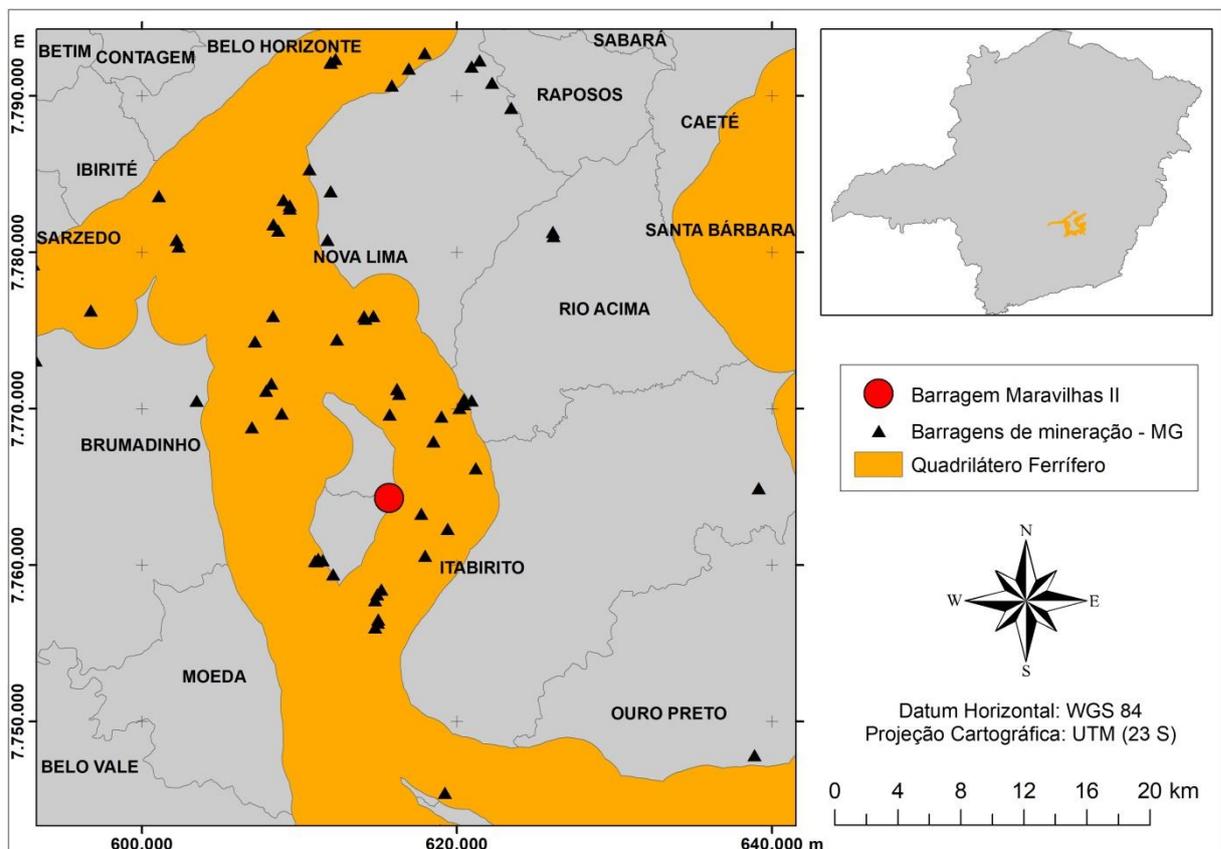


Figura 5 - Mapa de Localização da Barragem Maravilhas II.

5.2 Obtenção das Folhas

Para iniciar o estudo da barragem, foi necessário obter bases cartográficas com data anterior à sua construção. Para isso, foram utilizadas as seguintes folhas da PLAMBEL (Planejamento da Região metropolitana de Belo Horizonte), do ano de 1977:

- Folha de Itabirito, com escala 1:25.000, *Datum* horizontal Córrego Alegre, UTM Zona 23Sul e equidistância vertical entre as curvas de nível de 10m. Esta folha foi obtida no laboratório de Geoprocessamento do CDTN, no formato digitalizado.

- Folha de Lagoa Grande, com escala 1:25.000, *Datum* horizontal Córrego Alegre, UTM Zona 23 Sul e equidistância vertical entre as curvas de nível de 10m. A Folha foi adquirida na Biblioteca do IGC-UFMG em formato tradicional e escaneada em um scanner de rolo, com resolução de 500dpi, obtendo assim, a folha em formato digitalizado.

5.3 Georreferenciamento das Folhas

Para esta etapa, foi realizado o georreferenciamento da Folha de Itabirito e da Folha de Lagoa Grande (Figura 6). O georreferenciamento consistiu em ajustar as folhas através da determinação de pontos na superfície de acordo com as coordenadas já conhecidas, no *Datum* horizontal Córrego Alegre, UTM Zona 23S. Para uma melhor precisão, foram marcados 25 pontos em cada folha. Para obter um menor erro residual, foi utilizado o método de interpolação *spline*. Segundo Brito e Coelho (2002), o método de *spline* apresenta um resultado de melhor visualização e com menos erros de interpolação que outros métodos.

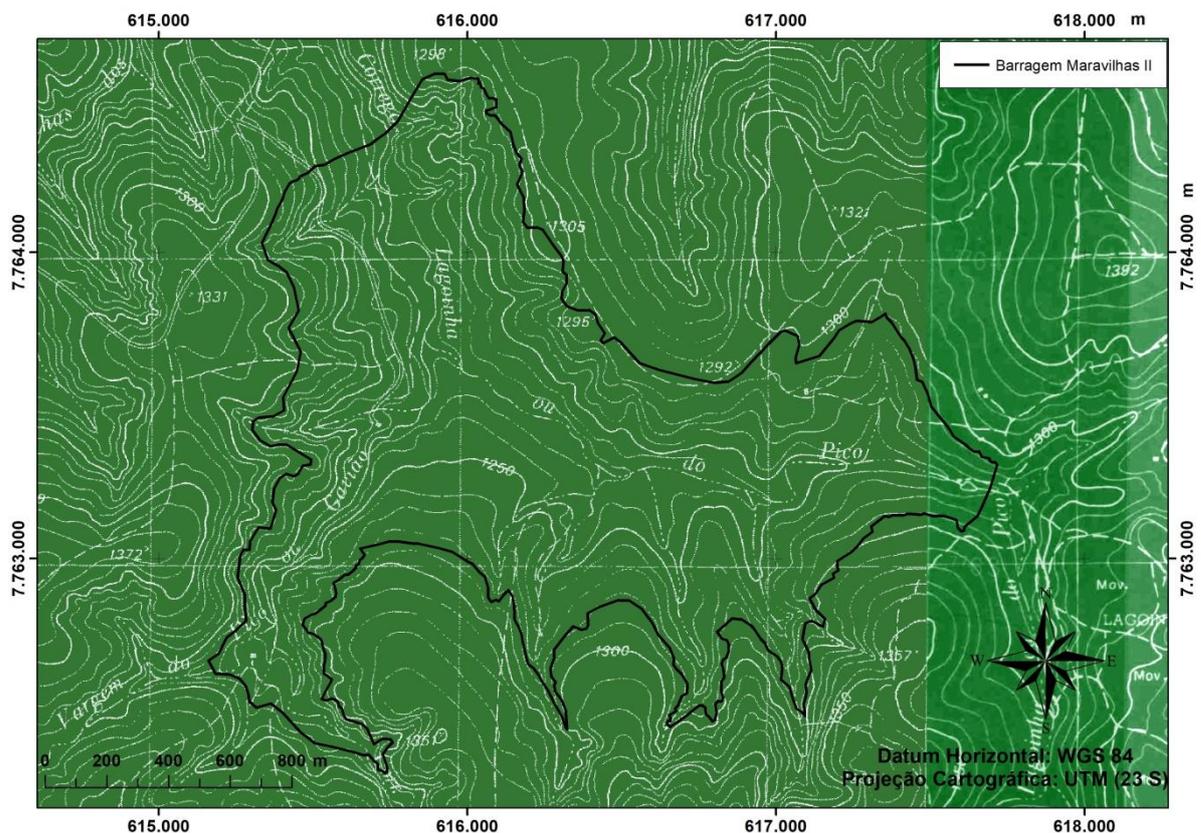


Figura 6 - Folhas de Itabirito e Lagoa Grande.

5.4 Vetorização

Na quinta etapa, iniciou-se o processo de vetorização (Figura 7). Para isso, foram criadas três *shapefiles*, que incluem: Hidrografia (linha), Curvas de nível (linha) e Pontos

cotados (pontos). A vetorização foi feita com base na Folhas da PLAMBEL descritas anteriormente. Após a vetorização, foram inseridos na tabela de atributos, os valores de altitude para as curvas de nível e para os pontos cotados.

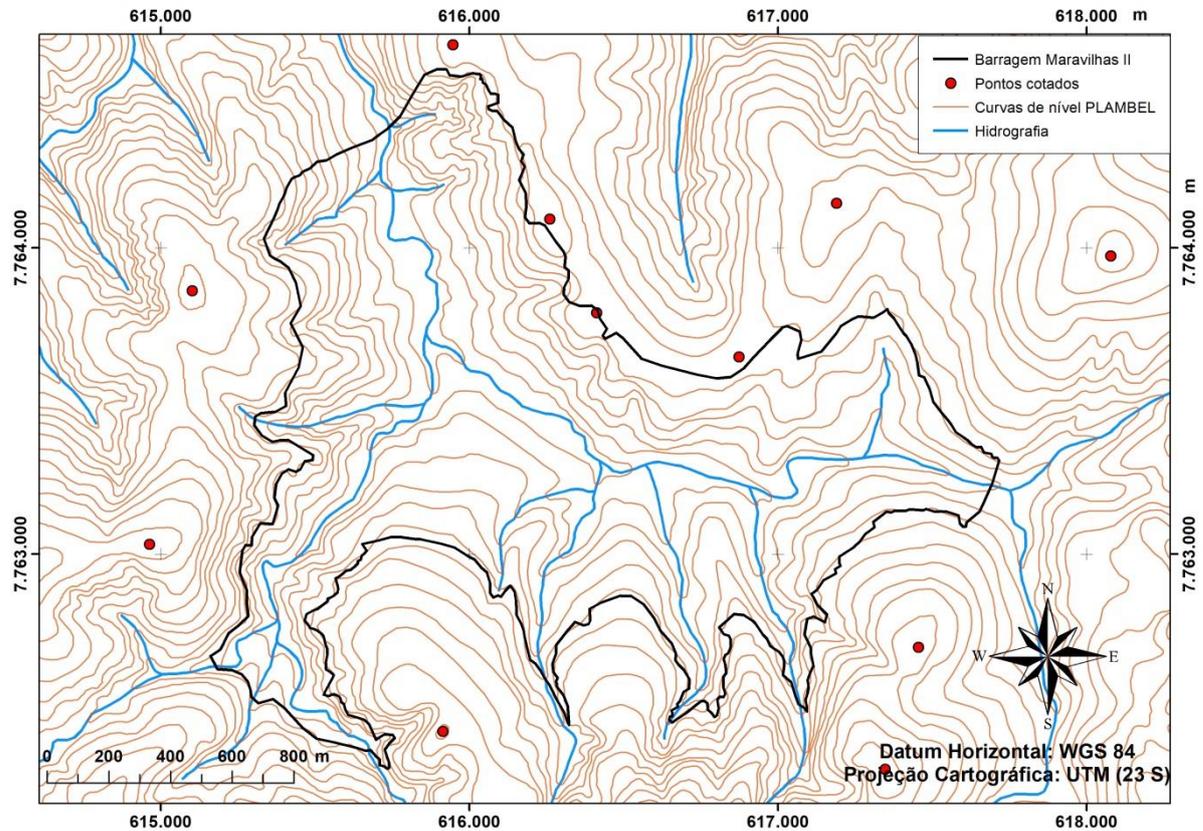


Figura 7 - Mapa de Hidrografia, Curvas de nível e Pontos Cotados de 1977 - Plambel.

5.5 Sobreposição das Folhas à imagem SRTM

Nesta etapa do trabalho, foi obtida a imagem SRTM de 30 m da região estudada, adquirida no site do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). A partir da imagem SRTM, foi possível obter um modelo digital de terreno e gerar curvas de nível com equidistância vertical entre as curvas de 10m.

Após geradas as curvas de nível do SRTM, estas foram sobrepostas às curvas de nível das cartas topográficas da PLAMBEL. Através de uma análise de comparação, percebeu-se que há um erro entre as curvas de nível.

Na Figura 8 abaixo é possível visualizar a sobreposição das curvas de nível geradas pelo SRTM e pelas folhas da PLAMBEL, assim como na Figura 9, em que é possível visualizar as curvas em uma maior escala.

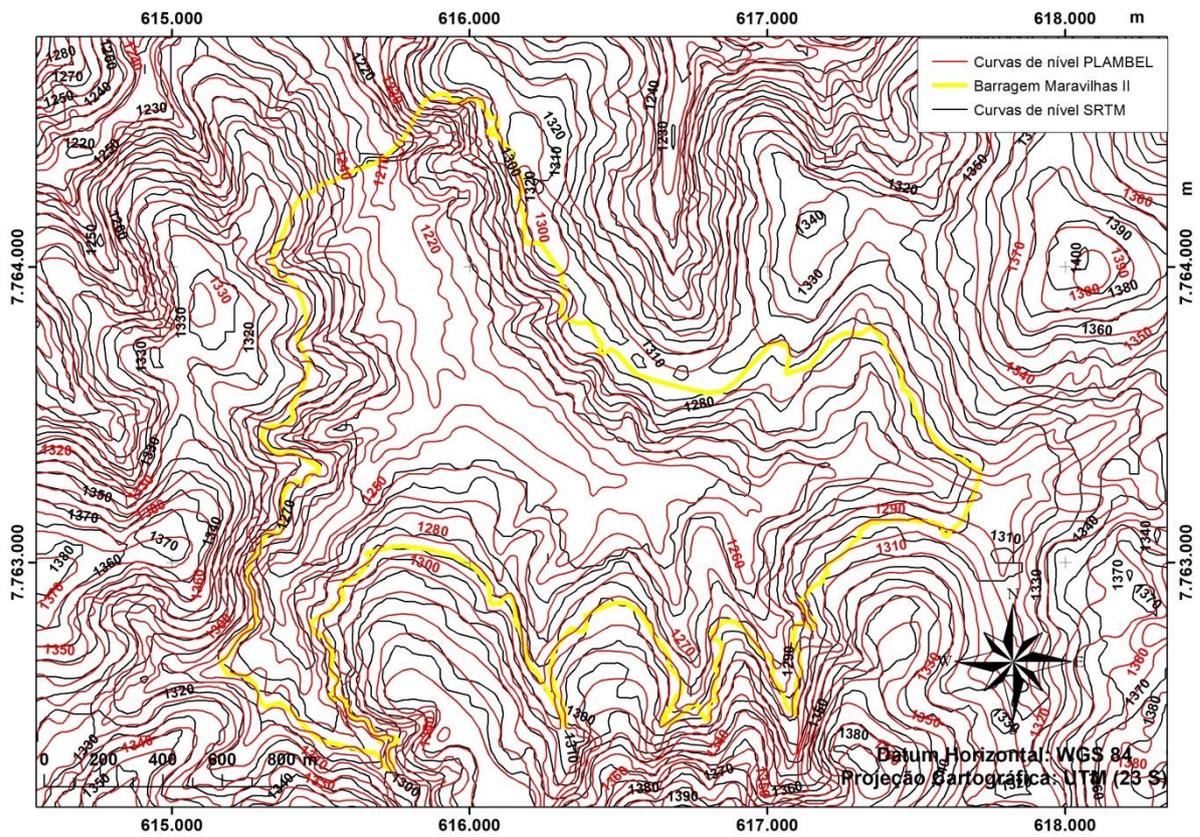


Figura 8 – Curvas de nível do SRTM(2000) e da PLAMBEL (1977).

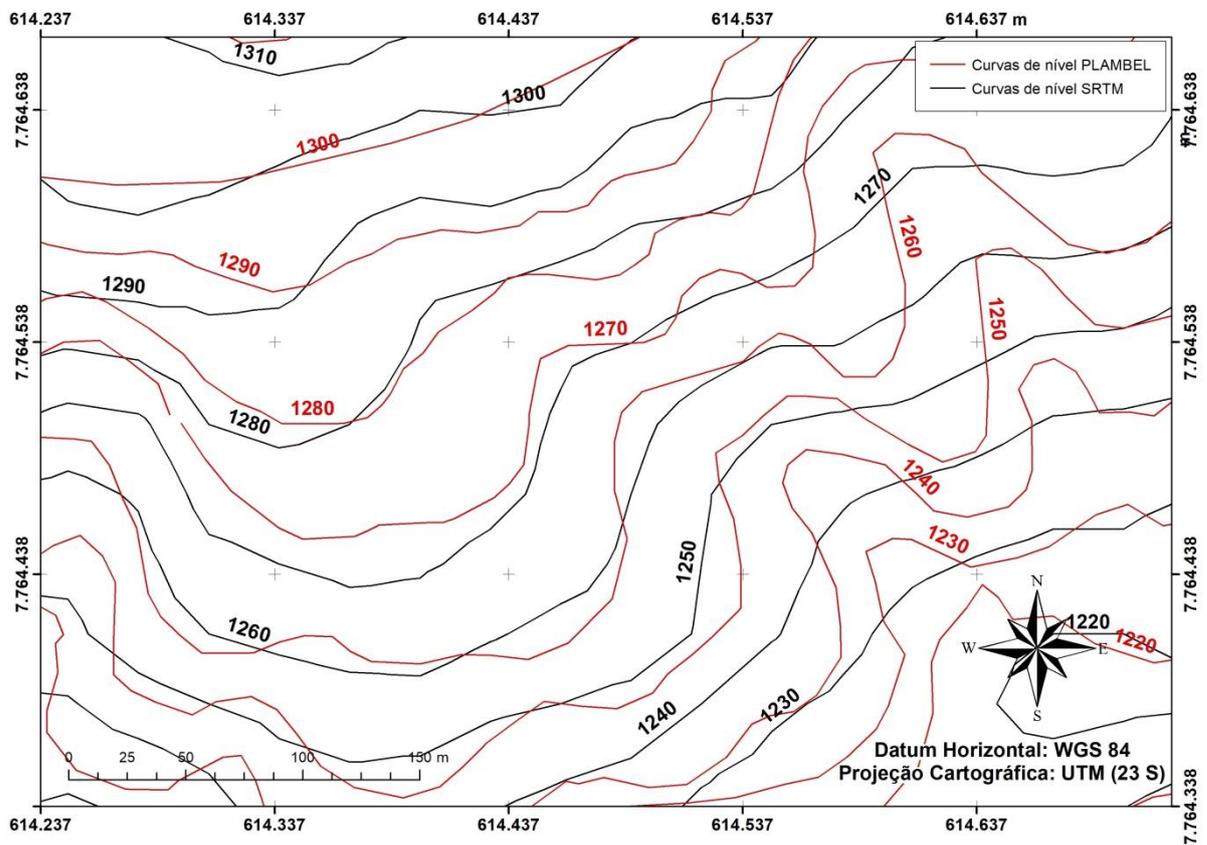


Figura 9 - Curvas de nível do SRTM(2000) e da PLAMBEL (1977) com escala maior.

Considerando os estudos de Ferreira (2014), é esperado que exista valores de erro sistemático relacionados à falta de compatibilização de datum vertical, já que os os dados de referência das folhas da PLAMBEL estão referenciados ao Sistema Geodésico Brasileiro – SGB com datum vertical referido à Imbatuba – SC, e o modelo SRTM possui referência vertical originada do EGM96.

Além disso, é importante salientar que as folhas da PLAMBEL são de 1977 e a imagem SRTM é de 2000. Durante esse intervalo de anos, houve modificação da paisagem, incluindo na área próxima à Barragem Maravilhas II, em que ocorreu o enchimento com rejeitos, onde antes estava localizado um vale.

Com o objetivo de obter o valor do erro médio entre as curvas, traçou-se 12 pontos ao longo dos MDE's, preferencialmente em lugares mais altos, onde supostamente não ocorreram alterações do terreno, como é possível observar na Figura 10 abaixo.

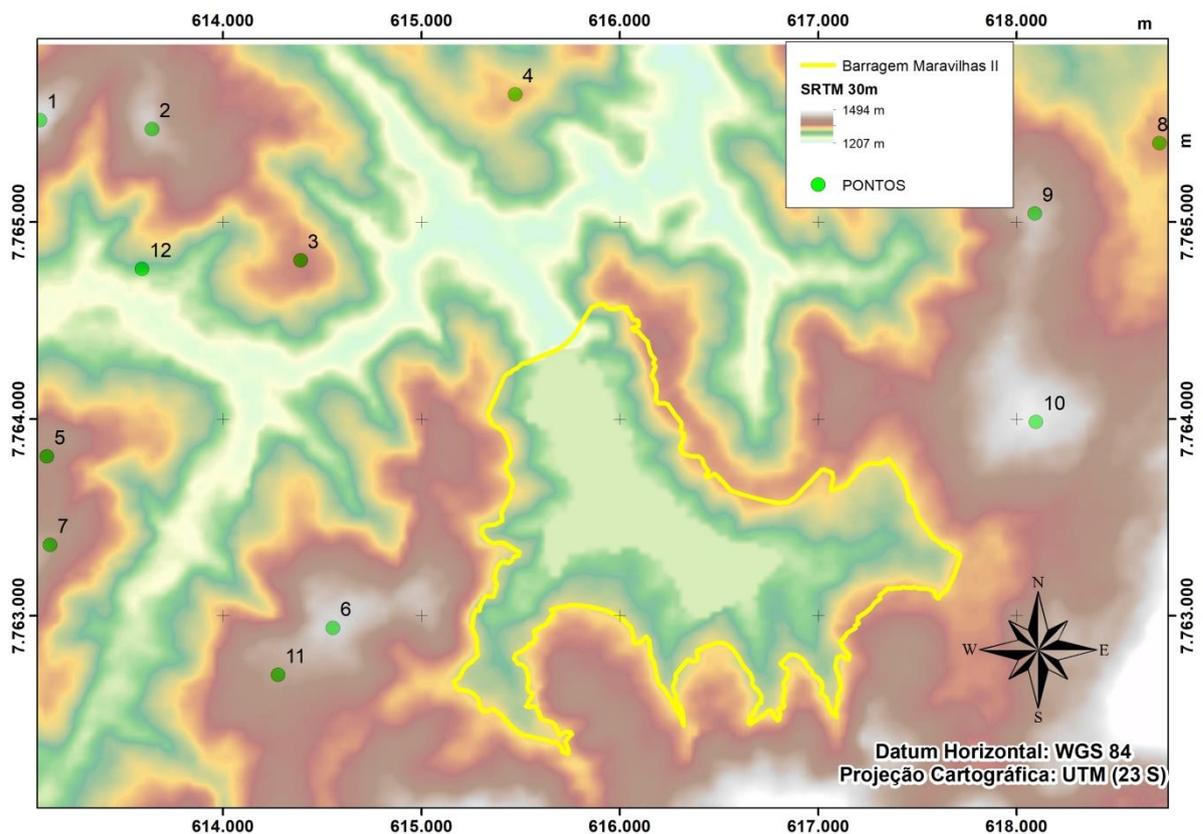


Figura 10 - Pontos de referência para cálculo do erro médio.

Através destes pontos, foram adquiridos os valores correspondentes de altitude tanto do MDE obtido pelas curvas da PLAMBEL, tanto pelo MDE obtido pelo SRTM. Com estes

valores, calculou-se o erro em cada ponto e obteve-se a média geral do erro de 3,12m, como pode ser observado na **Error! Reference source not found.**abaixo.

Tabela 3 - Variação do erro entre os valores SRTM e PLAMBEL

Ponto	Valores		Varição
	SRTM	Plambel	Δ
1	1.387,00	1.388,99	-1,99
2	1.376,00	1.375,01	0,99
3	1.323,00	1.314,97	8,03
4	1.305,00	1.300,83	4,17
5	1.354,00	1.347,12	6,88
6	1.384,00	1.382,86	1,14
7	1.360,00	1.357,15	2,85
8	1.309,00	1.307,96	1,04
9	1.376,00	1.372,30	3,70
10	1.398,00	1.392,81	5,19
11	1.361,00	1.357,79	3,21
12	1.262,00	1.259,73	2,27
		Média	3,12

Como a intenção do presente trabalho é calcular o volume de rejeitos da barragem, foi considerado apenas o modelo digital de terreno obtido das Folhas de 1977, ano antes da construção da barragem. Dessa forma, o modelo digital de terreno obtido através da imagem SRTM, que representa a topografia do ano de 2000, foi desconsiderado para este estudo.

5.6 Modelo Digital de Elevação e Cálculos

Nesta etapa, os mapas de relevo gerados a partir das folhas da PLAMBEL, representando o relevo da região em 1977, antes da construção da barragem, foram sobrepostos à um mapa de relevo representando o relevo de 2017 da região da barragem. A forma de geração dos MDEs será descrita detalhadamente no próximo tópico.

Após a sobreposição dos mapas, foi possível calcular a diferença da altitude do local da barragem antes e depois de sua construção. Dessa forma, foi possível obter uma estimativa em m³ do volume total de rejeitos contidos na Barragem Maravilhas II.

Para fins de comparação, o procedimento de obtenção do modelo digital de elevação foi realizado utilizando-se duas metodologias distintas, o TIN e o Modelo de Grade Regular Retangular, que serão descritas detalhadamente nos próximos tópicos.

5.6.1 TIN

O Diagrama a seguir faz uma síntese da metodologia de cálculo do volume da barragem utilizando-se o modelo TIN. Nos itens seguintes, têm-se a descrição detalhada da metodologia.

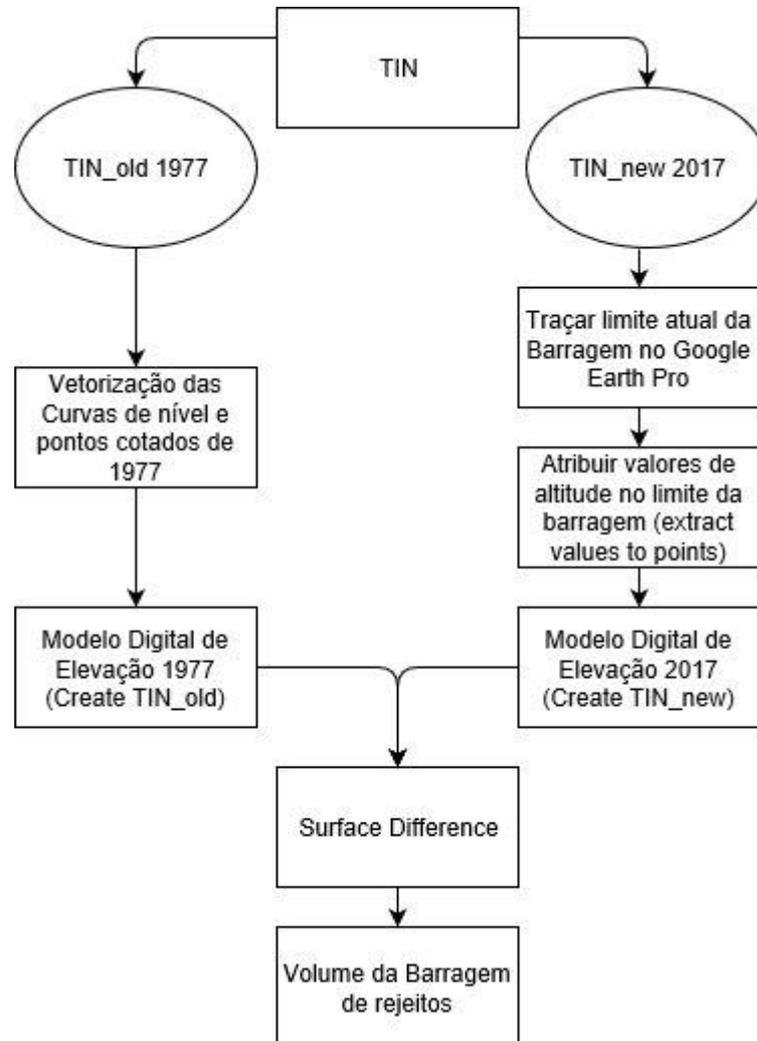


Figura 11 - Diagrama da metodologia TIN.

A partir dos vetores ‘curvas de nível’ e ‘pontos cotados’ citados no item 6.5, gerou-se um modelo de grade irregular triangular representando o modelo digital de elevação de 1977, como é possível verificar na Figura 12 abaixo, sendo compatibilizado no datum horizontal WGS 84.

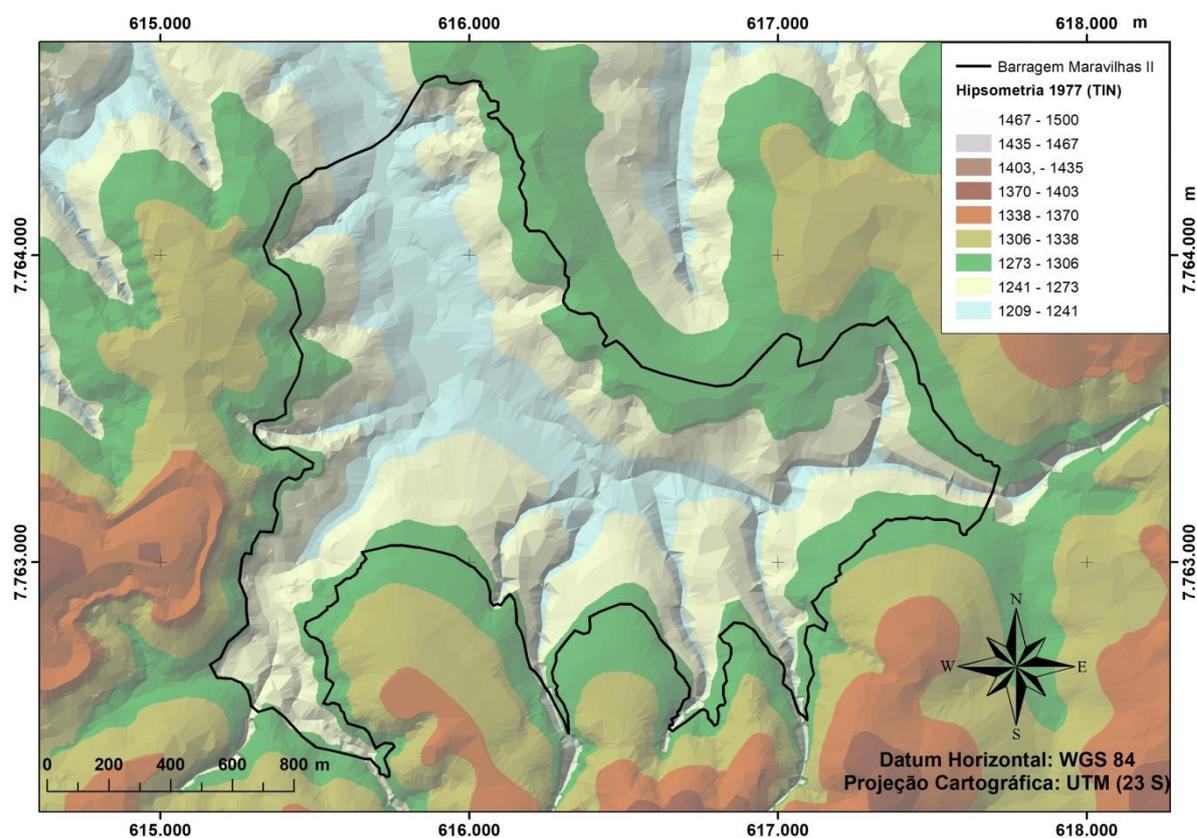


Figura 12 - Mapa hipsométrico 1977 (TIN).

Para o procedimento de gerar o mapa atual de relevo da barragem, foi necessário determinar o conjunto de pontos no terreno devido a construção da barragem. Ou seja, o conjunto de pontos que representam a parte em que está alagada de rejeitos. Supondo que o nível máximo do rejeito no reservatório é dado pela altura da barragem, então a capacidade do reservatório é determinada fazendo-se o somatório do volume de rejeito que pode ser armazenado em cada célula matriz. O volume é dado pelo produto entre a área da célula vezes a diferença entre a altura da barragem e a elevação do terreno naquela célula.

Para isso, primeiramente traçou-se o contorno da barragem no Google Earth Pro. Em seguida, no ArcGis, transformou-se o polígono gerado em linha e atribuiu-se os valores de altitude do TIN antigo (ou seja, ou valores de relevo antes da construção da barragem, obtidos pelas curvas de nível e pontos cotados através da vetorização das folhas de 1977) ao arquivo do limite da Barragem (feito no Google Earth Pro). Esse procedimento foi necessário para determinar a altura da barragem em todo o seu limite. Para isso, foi necessário transformar a linha do limite da barragem em pontos. Primeiramente, utilizou-se uma distância entre os pontos de 10 m e em seguida utilizou-se uma distância de 1m para uma melhor precisão.

Em seguida, com o arquivo do limite da barragem com valores de altitude atribuídos à ele, foi possível gerar o modelo digital de elevação atual. Dessa forma, o limite da barragem foi dado por pontos que representam os vértices e, através deles, se procedeu a triangulação irregular.

O procedimento de Grade Triangular Irregular gerou triângulos grandes na parte interna do limite da barragem, principalmente no modelo utilizando a distância entre os pontos do limite de 10m. Isso ocorreu pois a superfície da barragem é uma superfície plana, e, segundo Maune et al. (2001), onde a superfície é mais plana, somente uma pequena quantidade de pontos é amostrada, fazendo com que os triângulos fiquem maiores. Onde há maior variação da altura da superfície, mais dados são coletados, resultando em um maior número de triângulos.

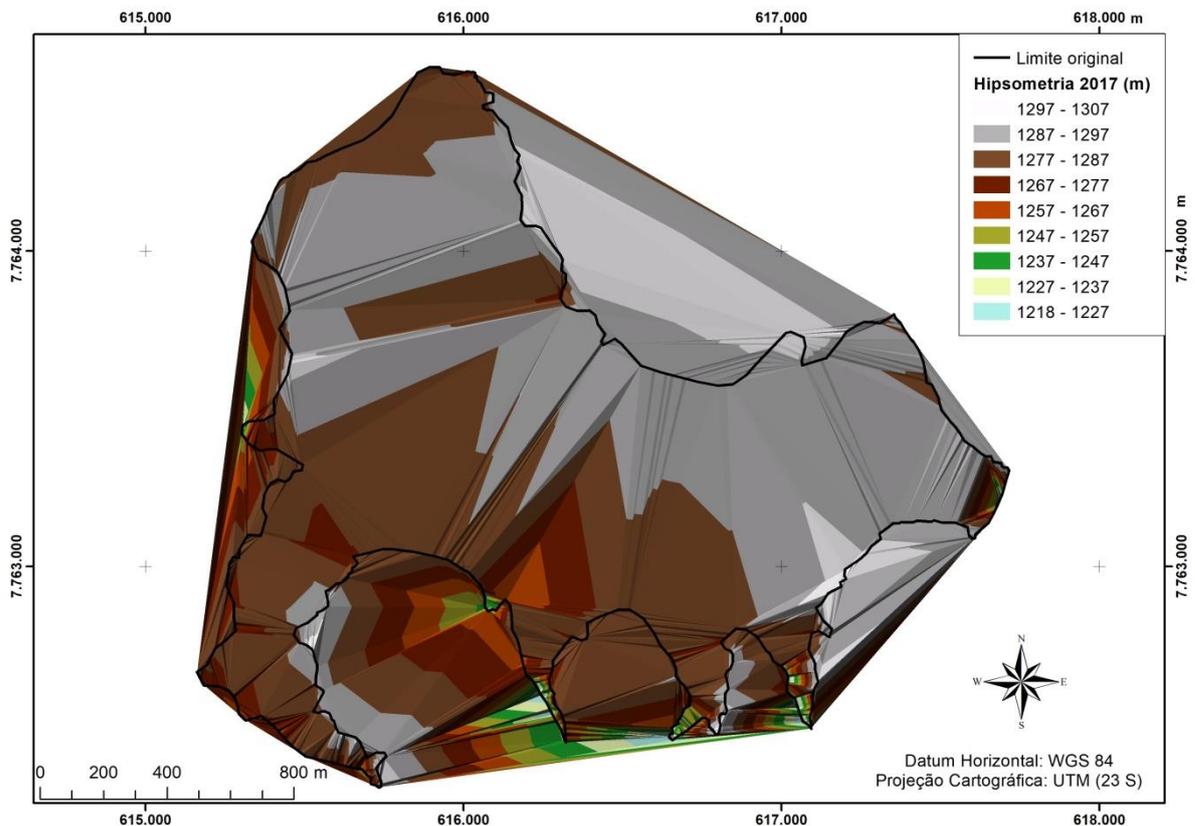


Figura 13 - Cálculo 01 - TIN –Hipsometria com limite original e distância entre os pontos igual a 10 m.

Por último, com os valores de altitude do relevo antes da construção da barragem de 1977 (TIN antigo) e com os valores de altitude depois da construção da barragem de 2017 (TIN atual), pôde-se calcular a diferença entre eles. O procedimento foi repetido três vezes, com o limite da barragem ajustado e com a distância entre os pontos do limite de 10 e 1m.

O procedimento de cálculo feito pelo TIN resultou nos seguintes mapas: Figura 14 - com o limite da Barragem original (ou seja, o limite traçado primeiro através da imagem do Google Earth Pro) e distância entre os pontos do limite de 10m; Figura 16 - com o limite ajustado e distância entre os pontos do limite de 10m; Figura 18 - com limite ajustado e a distância entre os pontos do limite de 1m e Figura 20, com limite ajustado novamente e distância entre os pontos de 1m.

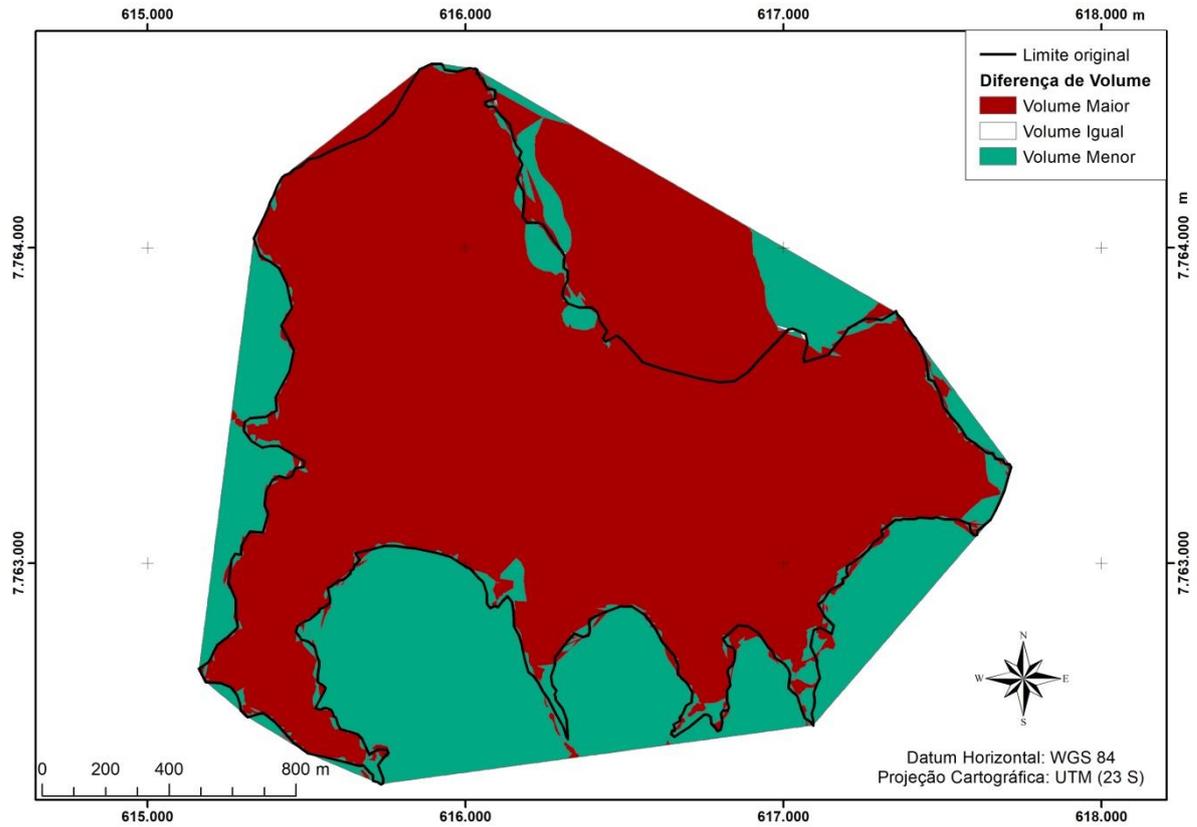


Figura 14 - Cálculo 01 - TIN - Variação volumétrica com limite original e distância entre os pontos igual a 10 m.

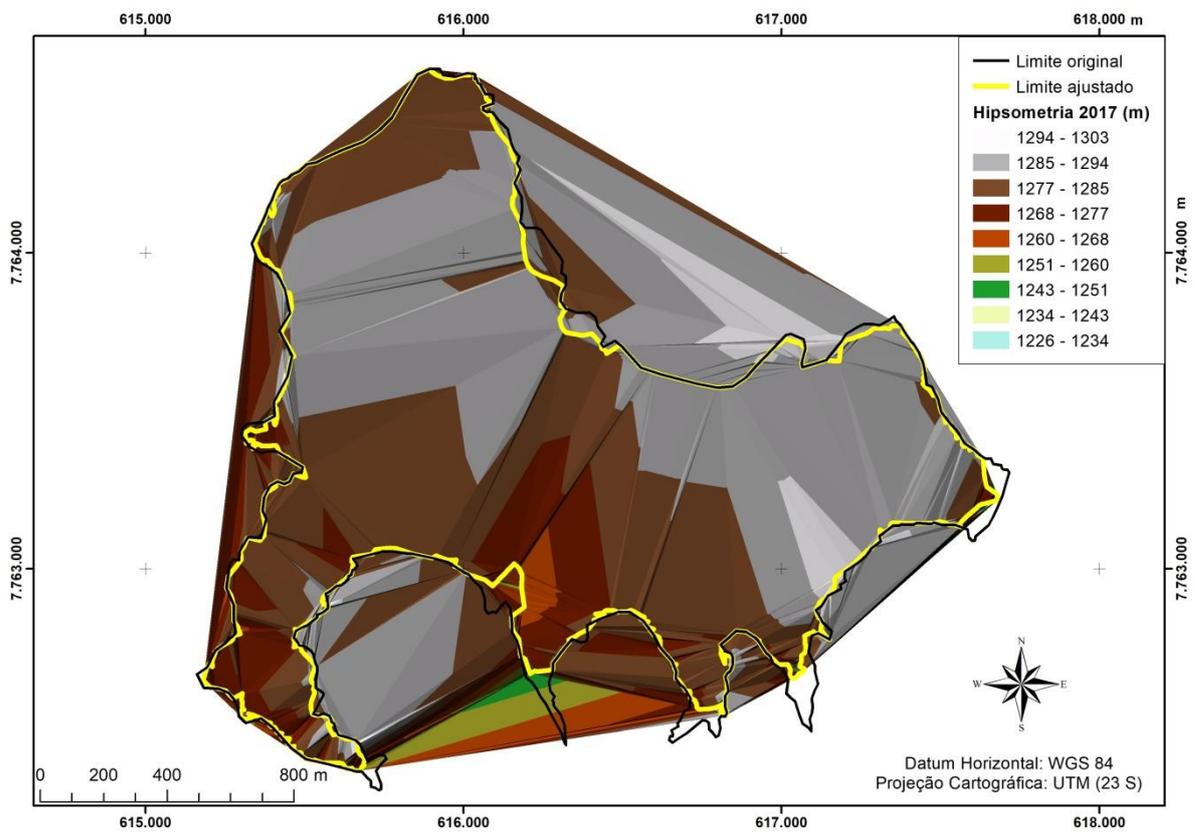


Figura 15 - Hipsometria com limite ajustado e distância entre os pontos de 10m.

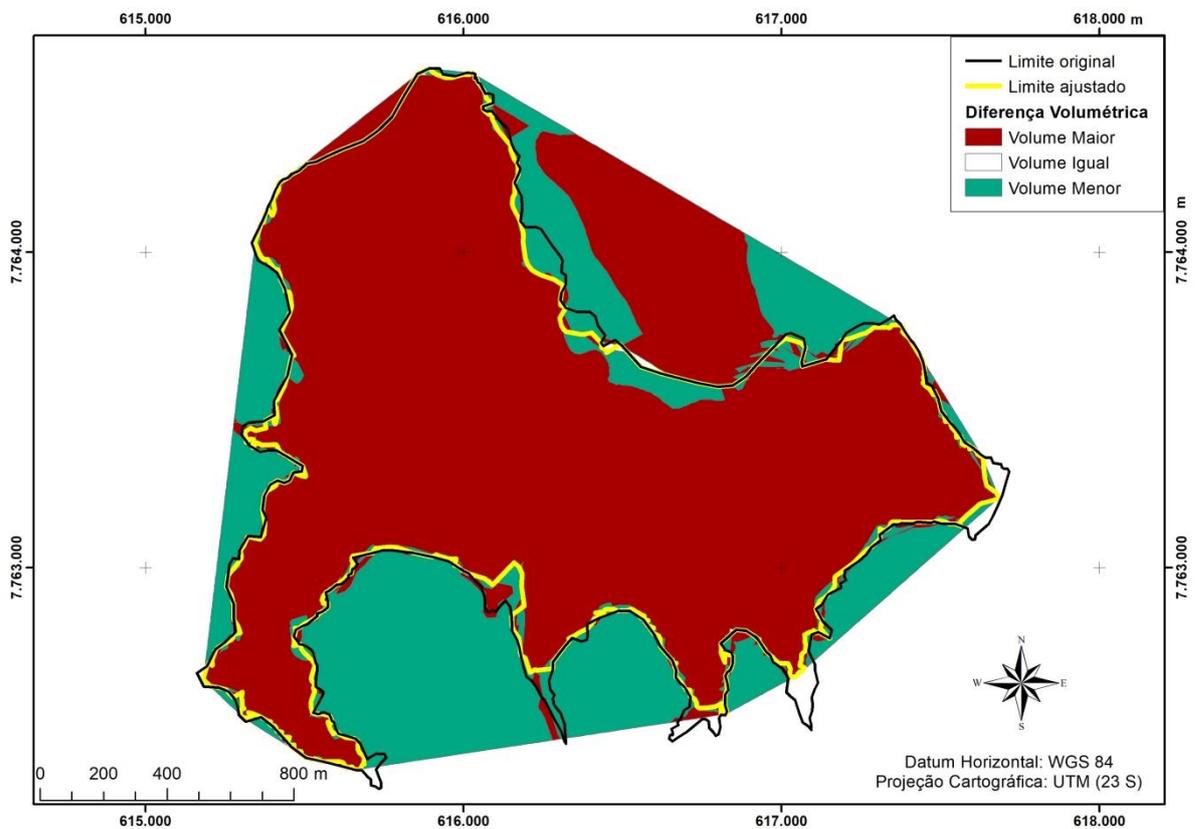


Figura 16 - Cálculo 2 - TIN – Diferença volumétrica, limite ajustado com distância entre os pontos de 10m.

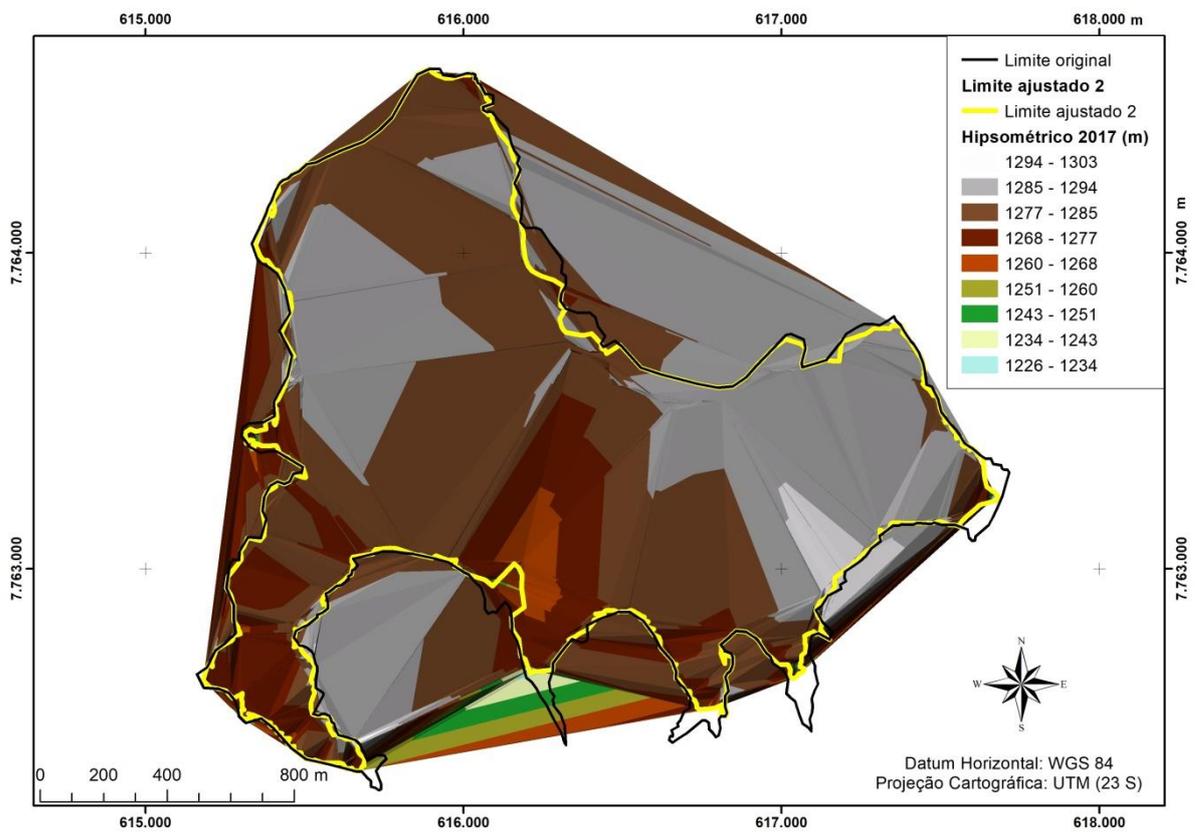


Figura 17 - Cálculo 3 - TIN - Limite ajustado 2 com distância entre os pontos de 1 m.

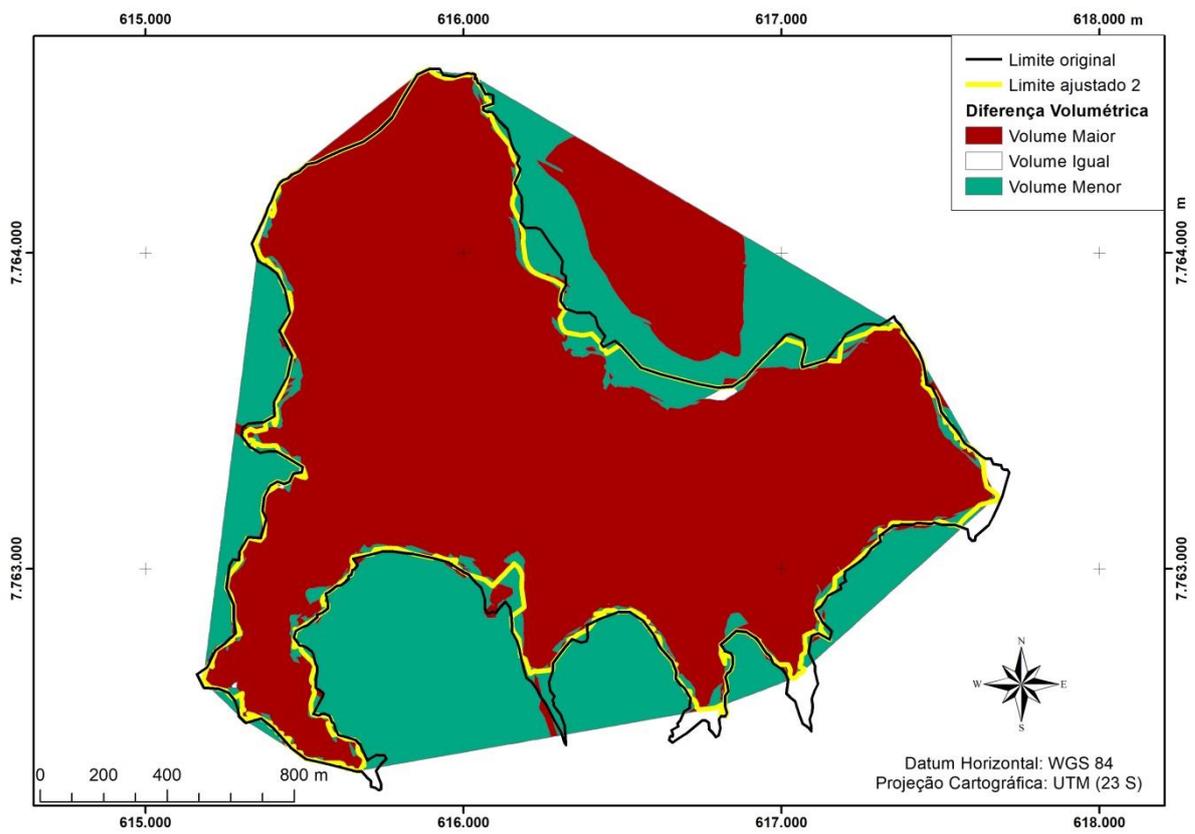


Figura 18 - Figura 15 - Cálculo 3 - TIN – Diferença volumétrica com limite ajustado 2 e distância entre os pontos de 1m.

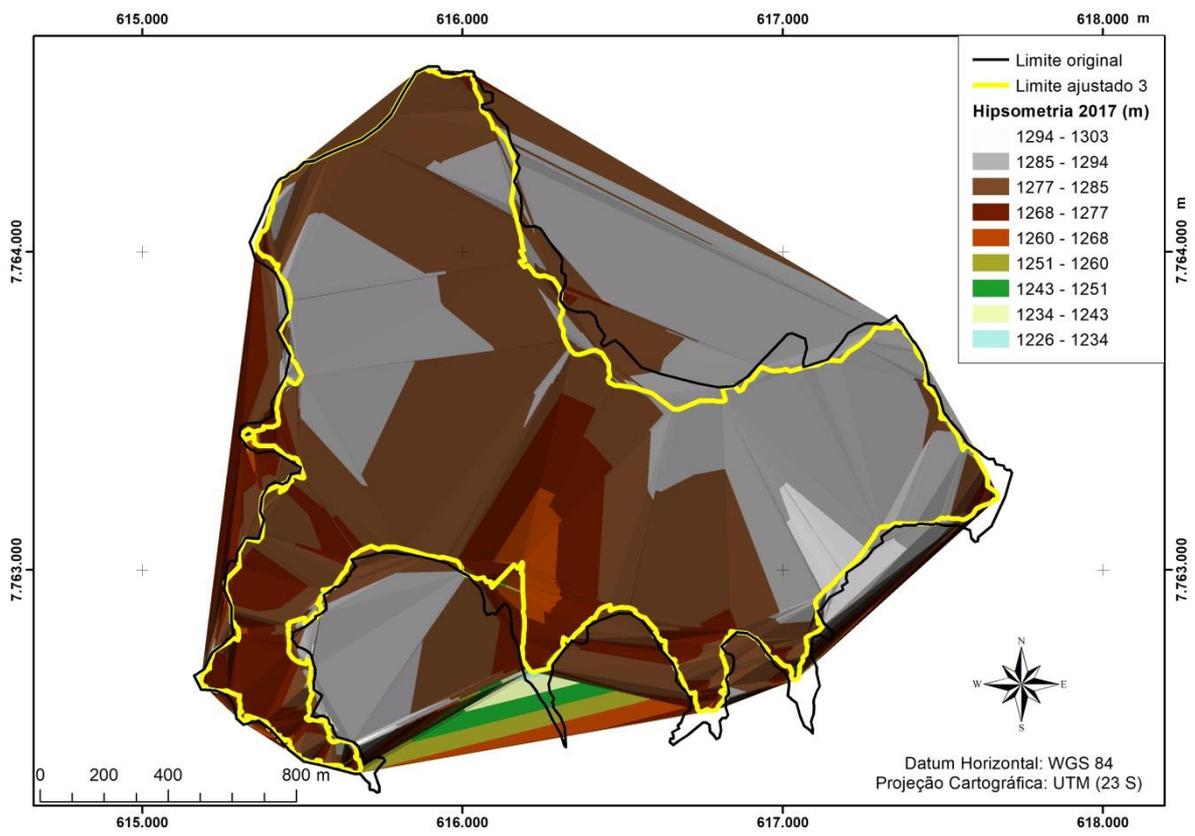


Figura 19 - Cálculo 4 - TIN – Hipsometria 2017 com limite ajustado 3 e distância entre os pontos de 1 m.

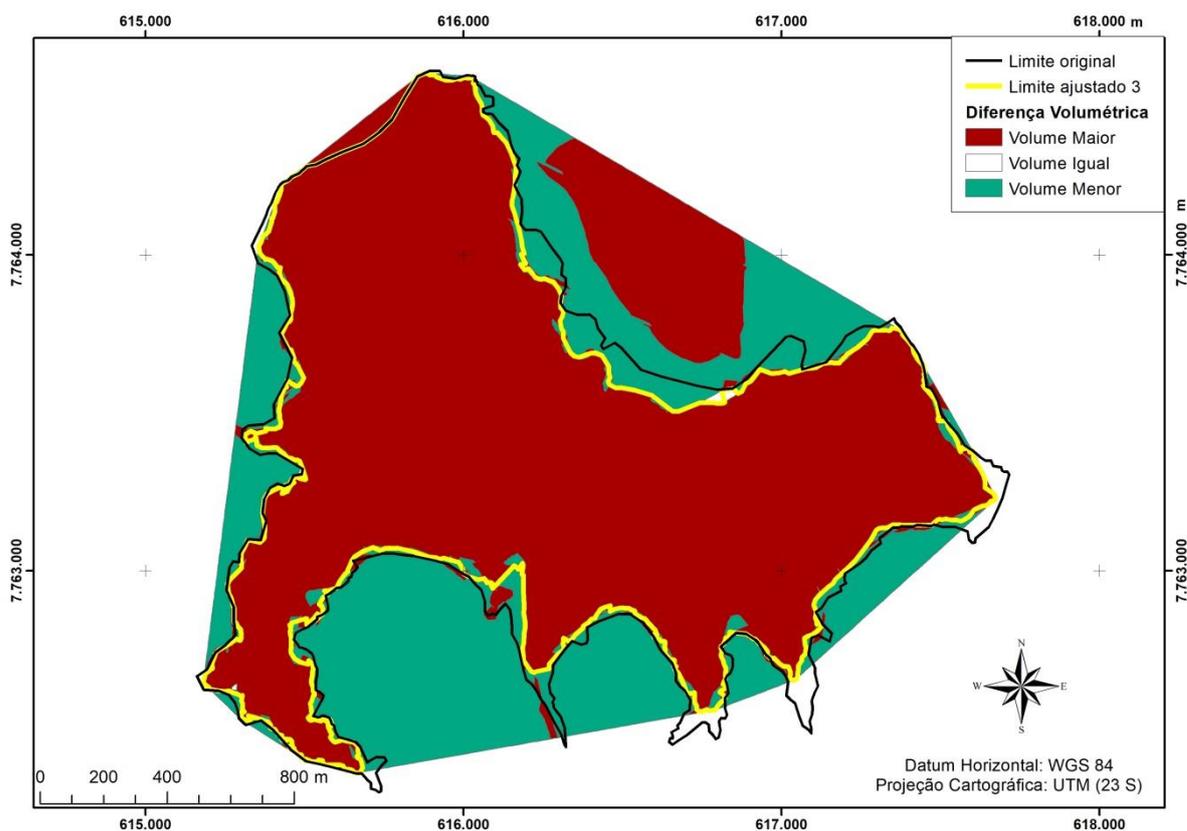


Figura 20- Cálculo 4 - TIN – Diferença volumétrica com limite ajustado 3 e distância entre os pontos de 1 m.

Contudo, não se obteve o resultado esperado na metodologia utilizando-se o Modelo TIN, pois à medida que se ajustava o limite, surgiram novas áreas em que o volume atual era menor que o volume antigo, mesmo dentro da barragem. Portanto, o resultado não foi considerado coerente. Além disso, o programa não permite que um arquivo TIN seja recortado, não sendo possível ajustar o mapa obtido ao limite da barragem.

5.7.1 Modelo de Grade Regular Retangular

O Diagrama a seguir faz uma síntese da metodologia de cálculo do volume da barragem utilizando-se o Modelo de Grade Regular Retangular. Nos itens seguintes, têm-se a descrição detalhada da metodologia.

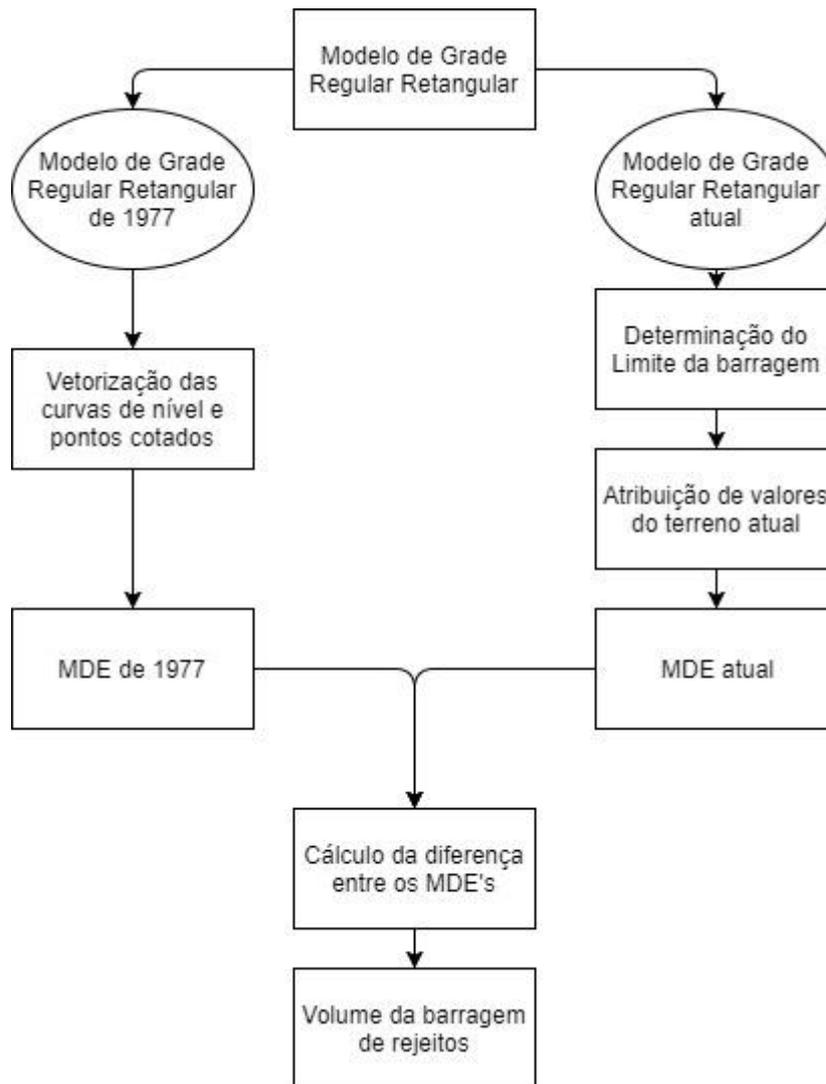


Figura 21 - Diagrama da Metodologia Topo to Raster.

Na metodologia utilizando-se o modelo de grade regular retangular, foram feitos os seguintes procedimentos:

Com a ferramenta ‘Topo to raster’ do ArcGis, gerou-se o Modelo de Grade Regular a partir dos vetores ‘curvas de nível’, ‘pontos cotados’ e ‘hidrografia’ criados no item 6.5. O modelo digital de elevação está representado na **Error! Reference source not found.** abaixo.

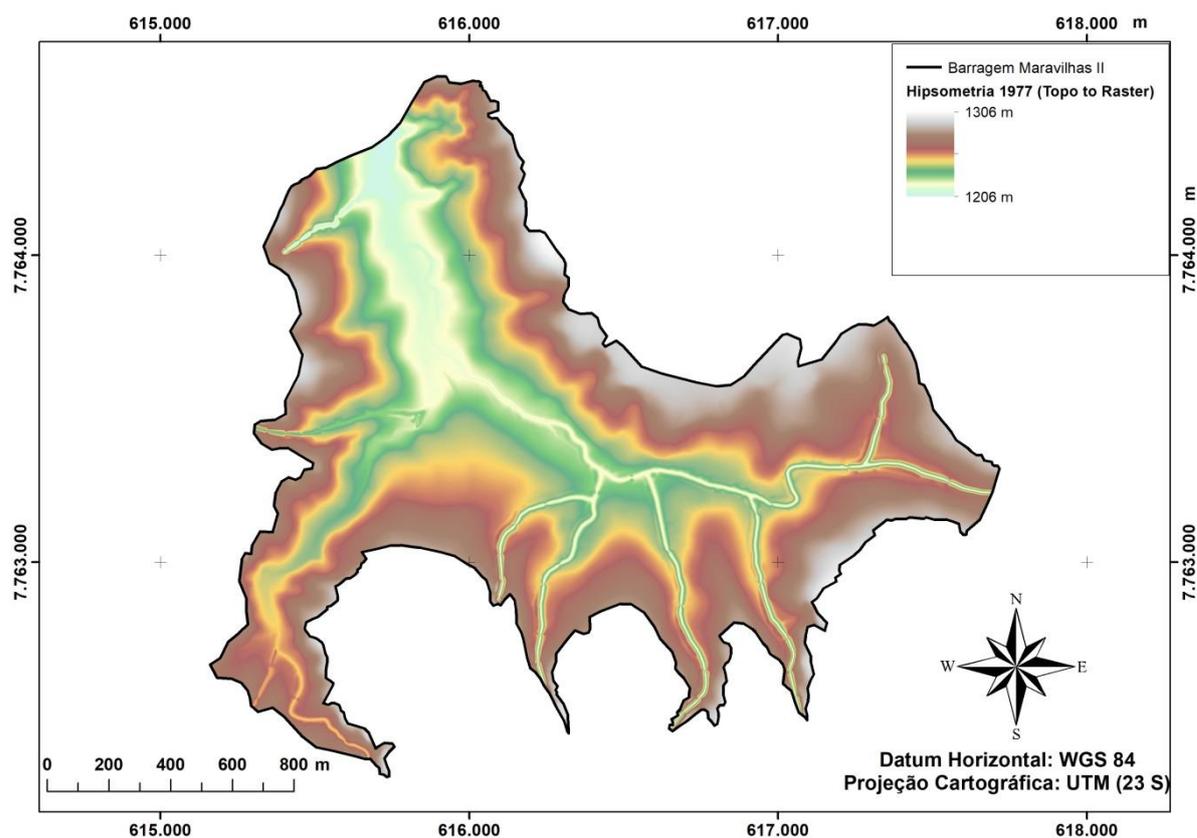


Figura 22 - Mapa Hipsométrico de 1977 (Modelo Regular Retangular).

O procedimento para gerar o MDE atual foi repetido do mesmo modo que o feito anteriormente pelo método TIN. Entretanto, para este método, para determinar o conjunto de pontos no terreno atual, os valores do limite da barragem foram obtidos a partir do mapa hipsométrico de 1977 gerado pelo Modelo de Grade Regular Retangular.

Em seguida, com os valores de altitude do relevo antes da construção da barragem de 1977 (Raster antigo) e com os valores de altitude depois da construção da barragem de 2017 (Raster atual), pôde-se calcular a diferença entre eles. O procedimento foi repetido com a distância entre os pontos de 1m e com o tamanho dos pixels também de 1m x 1m, para que os resultados tivessem melhor resolução espacial e ficassem mais precisos.

Os mapas resultantes do procedimento de cálculo feito pelo Modelo Regular Retangular foram: **Error! Reference source not found.** - com o limite da Barragem original (ou seja, o limite traçado primeiro através da imagem do Google Earth Pro), distância entre os pontos de 10m e pixel 20x20; Figura 26 - com o limite ajustado, com a distância entre os pontos de 10m e pixel 20x20; e Figura 28 - com distância entre os pontos de 1m e com pixel de 1x1.

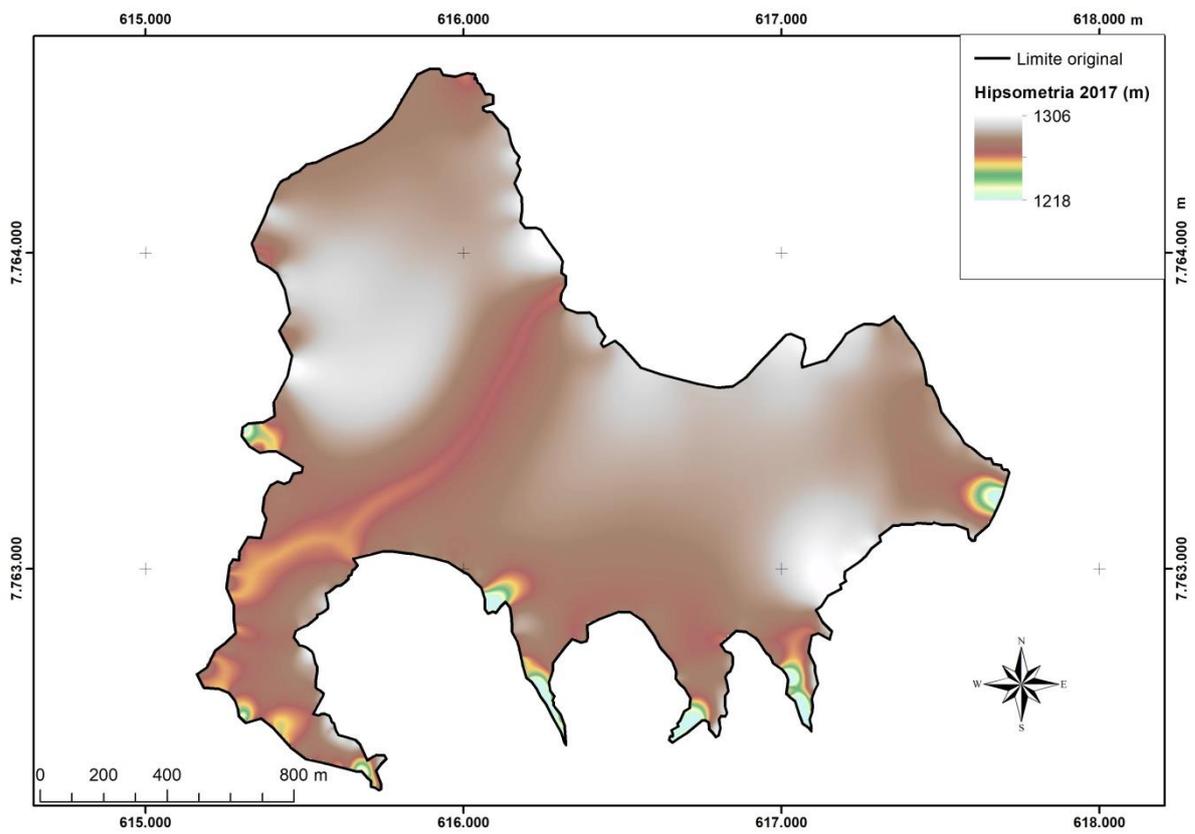


Figura 23–Cálculo 5 - Topo to Raster – Hipsometria 2017 com distância entre os pontos igual a 10 m e pixel 20x20.

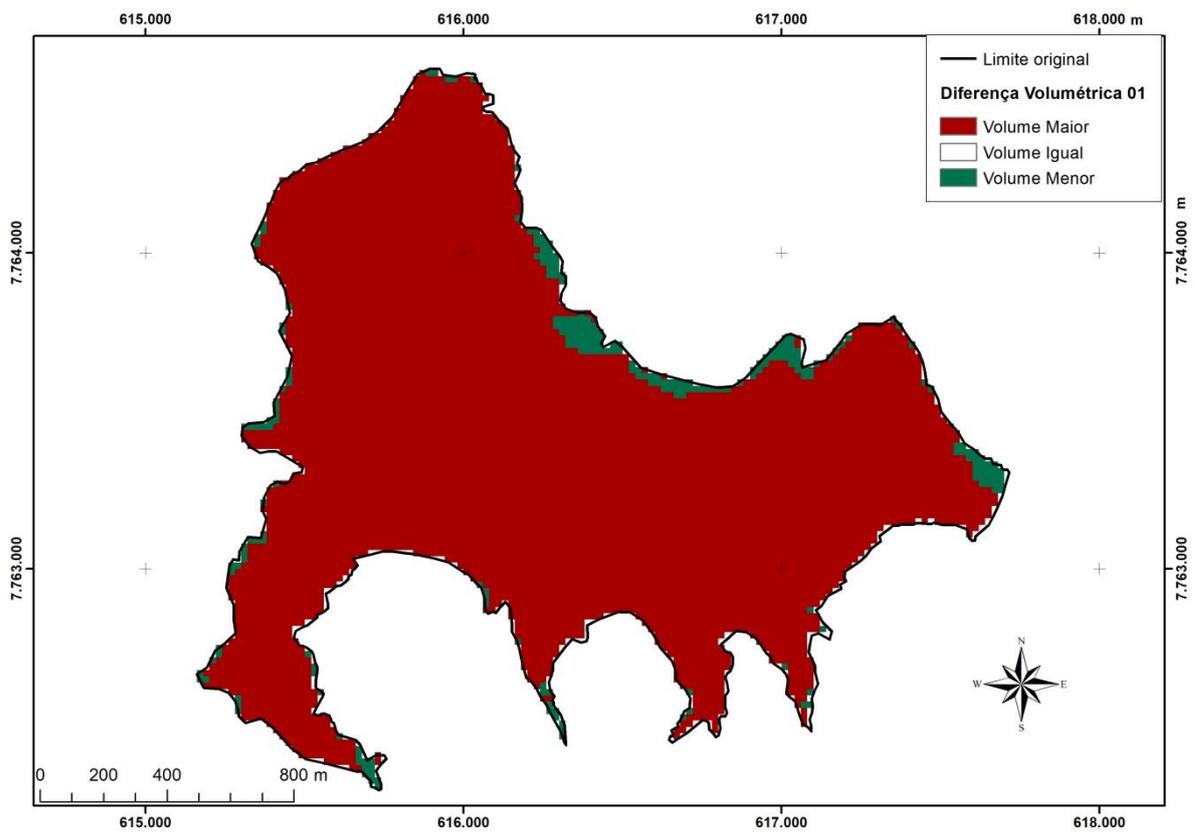


Figura 24 - Cálculo 5 - Topo to Raster – Diferença volumétrica com distância entre os pontos igual a 10 m e pixel 20x20.

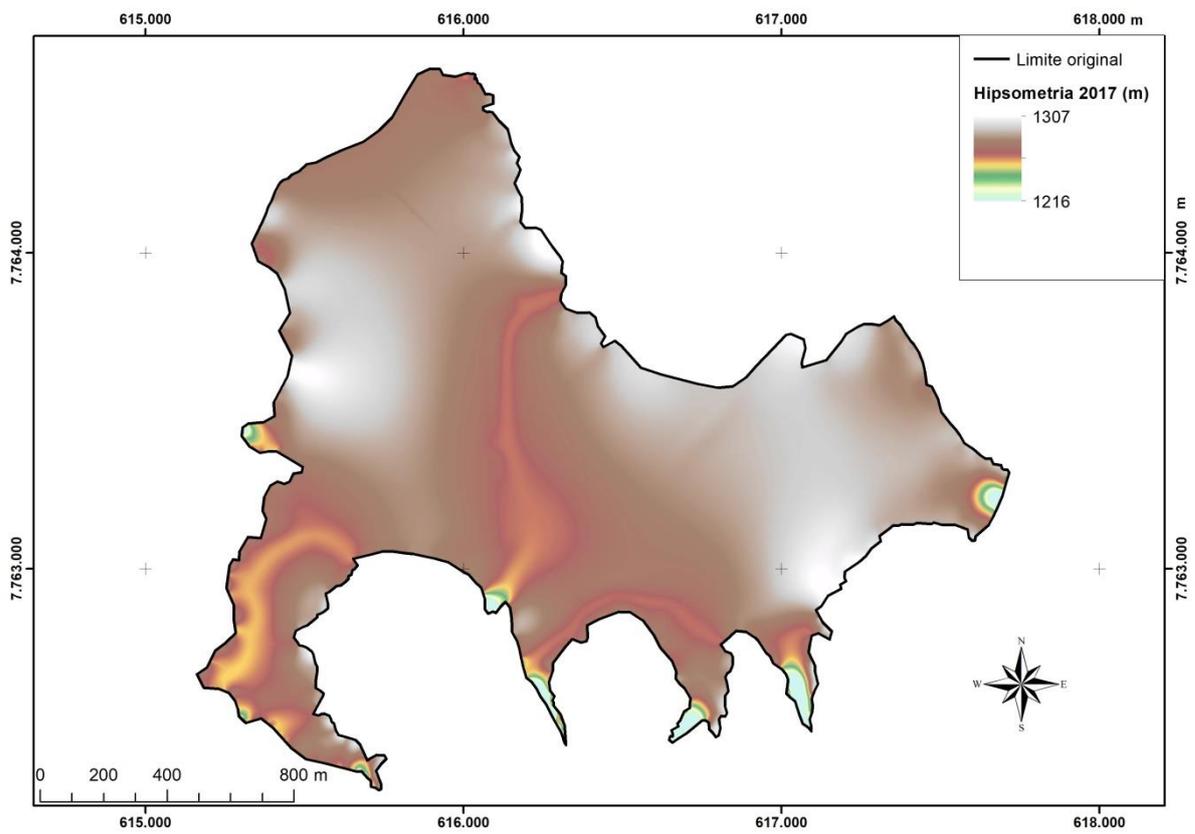


Figura 25 - Cálculo 6 - Topo to Raster – Hipsometria 2017 com limite ajustado com distância entre os Pontos igual a 1 m e pixel 20x20.

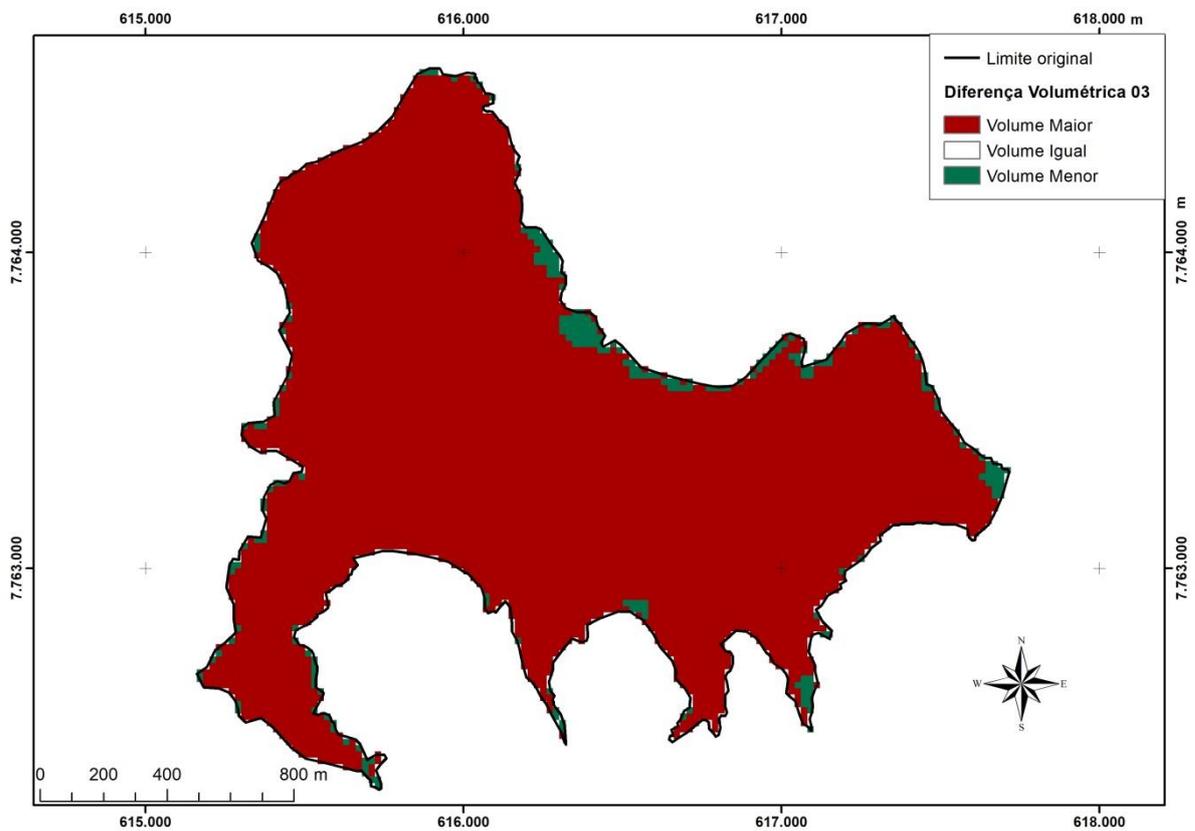


Figura 26 - Cálculo 6 - Topo to Raster – Diferença volumétrica com limite ajustado com distância entre os pontos igual a 1 m e pixel 20x20.

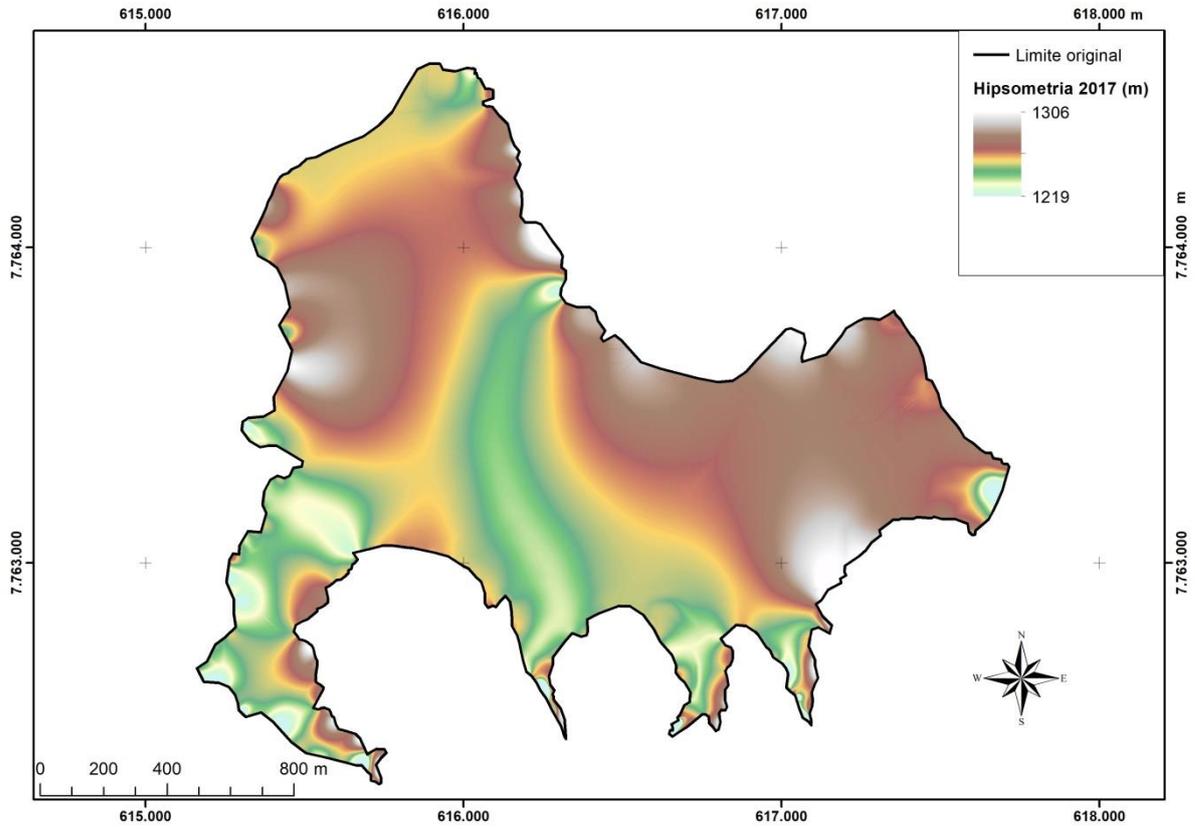


Figura 27 - Cálculo 07 –Topo to raster - Hipsometria 2017 com distância entre os pontos igual a 1 m e pixel 01x01.

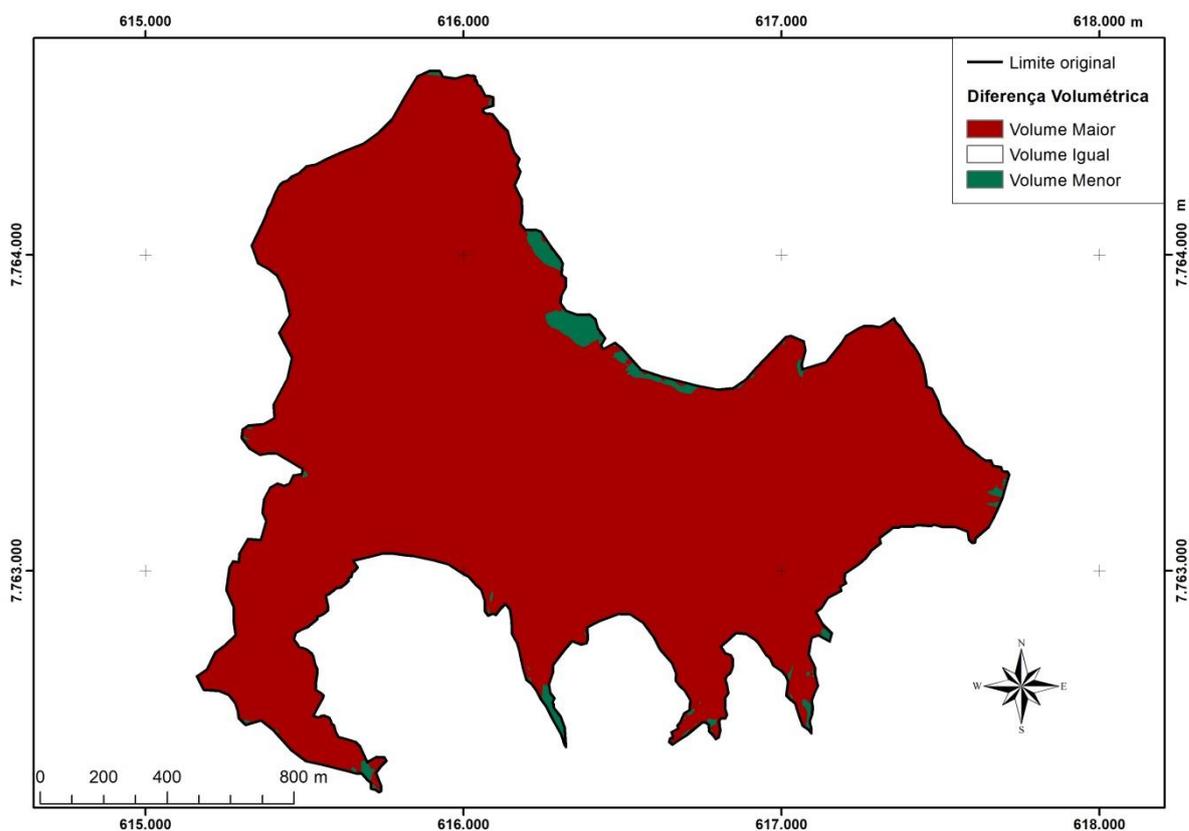


Figura 28 - Figura 25 - Cálculo 07 –Topo to raster – Diferença volumétrica com distância entre os pontos igual a 1 m e pixel 01x01.

O método de Grade Regular Retangular apresentou melhores resultados do que o método TIN, pois com ele foi possível determinar o volume de rejeito contido exatamente dentro do limite da barragem, devido à possibilidade de recorte. Além disso, a distância entre os pontos do limite de 1m, fez com que o cálculo fosse mais preciso, já que o espaçamento entre os valores da altitude foi menor do que com espaçamento de 10m, fazendo com que a barragem tenha informações mais detalhadas. Por último, a imagem com pixel de 1m x 1m é também mais precisa do que a imagem com pixel 20m x 20m, deixando o cálculo mais preciso.

6 RESULTADOS

As Tabelas 4 e 5 mostram os resultados dos volumes obtidos para cada método e para cada limite traçado para a Barragem Maravilhas II, tanto pelo método TIN como pelo método de Grade Regular Retangular.

Tabela 4 - Resultados TIN.

Cálculo	TIN	Volume (m³)
1	Limite original e distância de 10m	88.847.310,08
2	Limite ajustado e distância de 10 m	81.880.661,02
3	Limite ajustado e distância de 1 m	71.606.915,48
4	Limite ajustado e distância de 1 m	71.445.331,03

Tabela 5 - Resultados Grade Regular Retangular.

Cálculo	Modelo de Grade Regular Retangular	Volume (m³)
5	Limite original, distância de 10 m e pixel de 20 m	81.311.825,20
6	Limite original, distância de 1 m e pixel de 20 m	78.787.535,40
7	Limite original, distância de 1 m e pixel de 1 m	74.366.812,68

Considerando o método de Grade Regular Retangular como o melhor método para a representação do volume da barragem, que a distância de 1 metro entre os pontos do limite possui melhor detalhamento da barragem do que com distância entre os pontos de 10m, e que o pixel com tamanho de 1m x 1m possui melhor resolução do que de 20m x 20m, o volume final com melhor resultado encontrado para a barragem de rejeitos em questão foi o do cálculo 07, com 74.366.812,68 m³ de volume de rejeito.

Sendo assim, o volume de rejeito da Barragem Maravilhas II calculado por este método descrito, encontra-se em conformidade com a legislação ambiental, que prevê um volume máximo de 76.000.000 m³.

Contudo, considerando que, hipoteticamente, o volume da Barragem Maravilhas II, aumentou proporcionalmente ao longo dos anos, têm-se uma estimativa de que em 2018 o volume da barragem vai estar com 77.465.429,88 m³. Dessa forma, se a barragem continuar em operação, prevê-se que em 2018 o volume da barragem não vai estar em conformidade com a legislação ambiental. A Figura 28 mostra em formato de gráfico a previsão do aumento do volume da barragem até 2018.

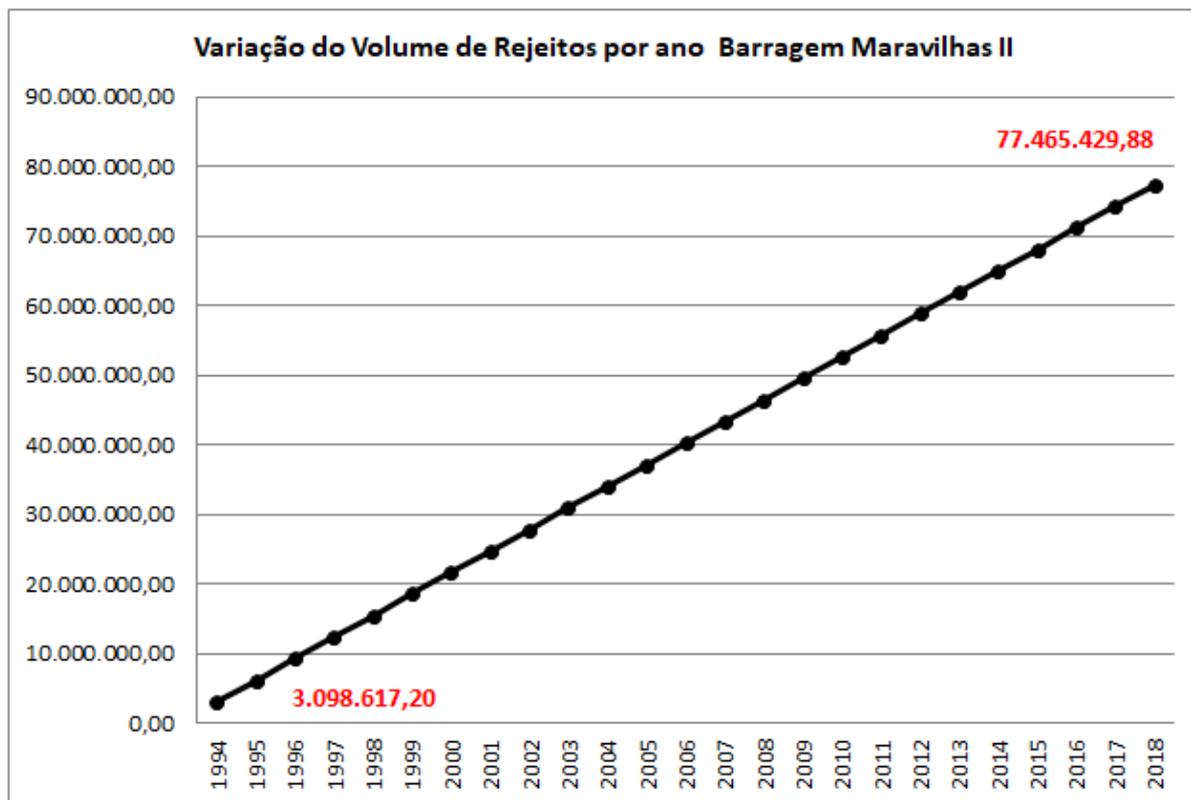


Figura 29 - Variação Volume (m³) x Tempo (ano).

Como resultado final, têm-se o mapa da Figura 16, representando o volume atual da Barragem Maravilhas II, obtido pelo método Topo to Raster.

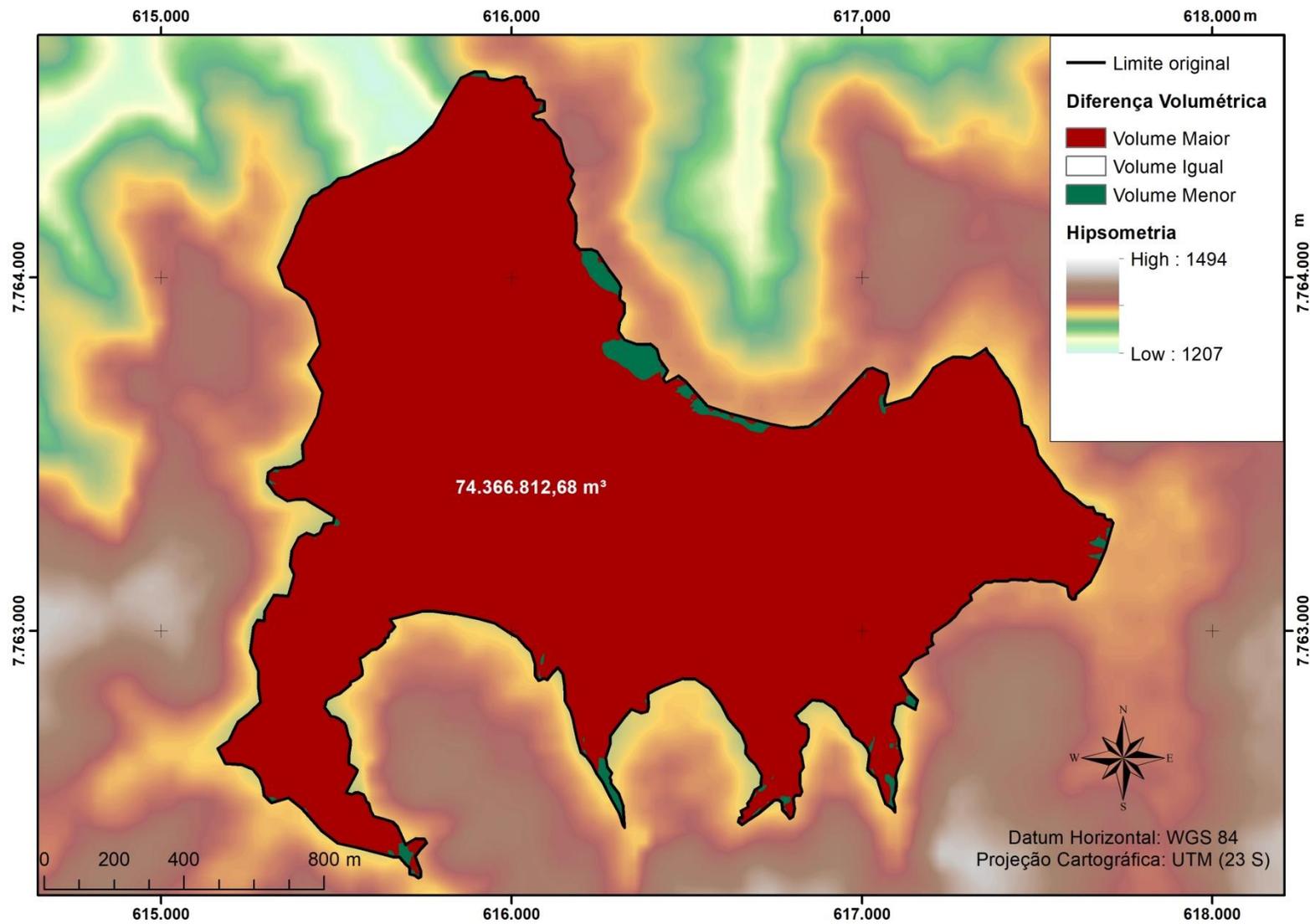


Figura 30 - Mapa Final de Volume da Barragem Maravilhaas II.

7 CONCLUSÃO

Após o rompimento da barragem de rejeito da SAMARCO (Vale S.A./BH Billiton) em novembro de 2015, as atenções se voltaram para a necessidade de um melhor conhecimento e controle das demais barragens. Uma das formas para se investigarem eventuais irregularidades dessas estruturas, que se localizam em vales de bacias hidrográficas, é a investigação se os volumes declarados pelas mineradoras para as suas bacias de rejeito realmente correspondem às informações prestadas nos respectivos processos de Licenciamento Ambiental.

Com as técnicas de Sensoriamento Remoto e de análise geomorfológica elaborou-se uma metodologia robusta em Geoprocessamento para o cálculo independente desses volumes. No presente trabalho, essa metodologia foi empregada na Barragem Maravilhas II, localizada no município de Itabirito e inserida no Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais. Para isso, foi calculado o volume de rejeito da Barragem Maravilhas II, através de subtração do mapa hipsométrico de 1977 (antes da construção da barragem) e do mapa hipsométrico atual (2017). O método de cálculo considerado mais preciso foi o de Grade Regular Retangular e, como resultado, obteve-se uma estimativa de 74.366.812,68 m³ de volume de rejeito inserido na Barragem Maravilhas II. Este resultado mostra que a barragem encontra-se em conformidade com a legislação ambiental, que prevê um volume máximo de 76.000.000 m³.

Contudo, considerando que, hipoteticamente, o volume da Barragem Maravilhas II, aumentou proporcionalmente ao longo dos anos, têm-se uma estimativa de que em 2018 o volume da barragem vai estar com 77.465.429,88 m³. Dessa forma, se a barragem continuar em operação, prevê-se que em 2018 o volume da barragem não vai estar em conformidade com a legislação ambiental.

No presente trabalho, foi desenvolvida uma metodologia independente de cálculo de estimativa de volumes de barragem de rejeitos, que pode ser replicada em outras barragens para que se possa ter um maior controle das estruturas e contribuir para o monitoramento destas, minimizando ou evitando possíveis impactos ambientais, sociais e econômicos causados pela atividade mineradora.

Contudo, é importante salientar que novas tecnologias mais precisas, porém mais custosas, podem ser utilizadas para este fim. Um exemplo é a utilização de Vants (Veículo Aéreo não tripulado) e Drones que captam imagens da superfície terrestre através de sensores aéreos por aeronaves não tripuladas.

REFERÊNCIAS

BRITO, Jorge. COELHO, Luiz. **Fotogrametria Digital** - 1ª Edição. IME - Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2002.

ALBERTI, G. A. VICTORINO, H.S. **Deteção da expansão da barragem de rejeitos Maravilhas II (MG) por Subtração Simples de Bandas e Análise de Componentes Principais** - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, São José dos Campos - SP, 2015.

BARRETO, M. L. **Mineração e desenvolvimento sustentável: desafios para o Brasil**. CETEM/MCT, Brasil. 2001. <http://pubs.iied.org/pdfs/G00580.pdf>

BRASIL. Lei 12.334, de 20 de setembro de 2010. Estabelece a **Política Nacional de Segurança de Barragens** destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens e altera a redação do art. 35 da Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, e do art. 4º da Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000.

CONSELHO ESTADUAL DE POLÍTICA AMBIENTAL (Minas Gerais). **Deliberação Normativa nº 87, de 17 de junho de 2005**. Altera e complementa a Deliberação Normativa COPAM nº 62, de 17/12/2002, que dispõe sobre critérios de classificação de contenção de rejeitos, de resíduos e reservatórios de água em empreendimentos industriais e de mineração no Estado de Minas Gerais.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL – DNPM. **Informe Mineral**. Brasília: DNPM, 2014. Disponível em: <http://www.dnpm.gov.br/dnpm/informes/informe_mineral_2014-02.pdf> . Acesso em: jul. 2017.

FERREIRA, G. F. **Emprego de simulação no controle de qualidade em cartografia aplicado a modelos digitais de superfícies oriundos de sensores orbitais segundo PEC-PCD**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2014.

Fundação Estadual de Meio Ambiente – FEAM. **Inventário de Barragem do Estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte, 2016.

FONSECA, C. O . **A dinâmica espacial da Serra do Gandarela e entorno a partir da formação de territórios: análise e representações coremáticas**. Dissertação (Mestrado em Geografia). Uniersidade Federal de Minas Gerais, Belo Hotizonte, 2014. <http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/IGCC-9SYMQ8/disserta__o_charles_de_oliveira_fonseca.pdf?sequence=1> Acesso em: set. 2017.

IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis **Laudo técnico preliminar: impactos ambientais decorrentes do desastre envolvendo o rompimento da barragem de Fundão, em Maria, Minas Gerais**. 2015. Disponível em: <http://ibama.gov.br/phocadownload/barragemdefundao/laudos/laudo_tecnico_preliminar_Ibama.pdf> Acesso em: set. 2017.

LONGHITANO, G. A. **Vants para Sensoriamento Remoto: Aplicabilidade na Avaliação e Monitoramento de impactos ambientais causados por acidentes com cargas perigosas**. 2010. 163f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes – Geoprocessamento). Escola Politécnica da Unviersidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

MAUNE, D.F. et al..**Digital Elevation Model Technologies and Applications: The DEM Users Manual**. American Society for photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda, MD. 2001.

MUNDIM, R. A. L. **Geoprocessamento aplicado à análise espacial de uso e ocupação do solo na área urbana e entorno de São José da Lapa**. Monografia de Especialização. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2001.

MORAIS, D. J. **Avaliação de Modelos Digitais de Elevação Provenientes de Dados de Sensoriamento Remoto de Distribuição Gratuita**. 2002. 94f. Dissertação (Mestrado em Modelagem de Sistemas Ambientais. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

NAMIKAWA, L. M. et al. **Modelagem numérica de terreno e aplicações**. São José dos Campos: Deposited in the URLib collection, 2003.

NASCIMENTO, M. C.; SOARES, V. P.; RIBEIRO, C. A. Á. S.; SILVA, E. **Delimitação automática de Áreas de Preservação Permanente (APP) e identificação de conflito de uso da terra na Bacia Hidrográfica do Rio Alegre**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12. (SBSR), 2005, Goiânia. Anais... São José dos Campos: INPE, 2005. p. 2289-2296. CD-ROM, On-line. ISBN 85-17-00018-8. Disponível em: . Acesso em: 16 out. 2017.

OLIVEIRA, G. B.; IMAI, N. **Interpoladores: modelos digitais do terreno: grades regulares e irregulares e suas características**. Presidente Prudente: UNESP, 2010.

RIBEIRO, S. J. **Determinação de Volumes em atividades de mineração utilizando ferramentas do sensoriamento remoto**. Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção do título Doctor Scientiae no programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Viçosa, 2011.

REZENDE, V. L. **A mineração em minas gerais: uma análise de sua expansão e os impactos ambientais e sociais causados por décadas de exploração**. 2016. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/sn/v28n3/1982-4513-sn-28-03-0375.pdf>> Acesso em: jul. 2017.

ROSSI, E. **Utilização de técnicas de geoprocessamento para monitoramento de atividades de mineração ao longo de dutos: polduto Rio de Janeiro/ Minas Gerais**. Monografia apresentado ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Campus de Rio Claro (SP) da Universidade Estadual Paulista “Júlio Mesquita Filho” para obtenção de grau de Engenharia Ambiental. Rio Claro, 2010.

SALGADO, M. P. G. FORMAGGIO, A. R. RUDORFF, B. F. T. **Comparação entre métodos para geração de modelos digitais de elevação a partir de dados cartográficos**. Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Curitiba, PR, Brasil, 30 de

abril a 05 de maio de 2011, INPE p.8880. Disponível em:
<<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2011/files/p0390.pdf>>.

SILVA, A. S. Mineração e áreas de preservação permanentes (APPs) em Santo Antônio de Pádua – RJ. Soc. & Nat., Uberlândia, ano 23 n. 2, 173-185, maio/ago. 2011

SIMÕES, H. C. G. Q. A história e os efeitos sociais da mineração no estado do Amapá. PRACS: Revista Eletrônica de Humanidades do Curso de Ciências Sociais da UNIFAP, Nº 2. Dez. 2009.

SOUZA, J. R. C. et al. Heurística para o posicionamento de reservatórios d'água. In ` Anais do XI Simposio Brasileiro de Geoinformatica, 2010.

TONIETTO, A.; SILVA, J. J. M. C. Valoração de danos nos casos de mineração de ferro no brasil. Revista brasileira de criminalística, v.1, n.1, pp. 31-38. 2011.

VALERIANO, M. M. Modelos digitais de elevação de microbacias elaborados com krigagem. São José dos Campos: INPE, 2002. 54 p. (INPE-9364-RPQ/736).
<<http://www.bdpa.cnptia.embrapa.br/consulta/busca?b=ad&id=249930&biblioteca=vazio&busca=autoria:%22VALERIANO,%20M.de%20M.%22&qFacets=autoria:%22VALERIANO,%20M.de%20M.%22&sort=&paginacao=t&paginaAtual=1>> Acesso em: set. 2017.

VILLARON, M. A. e BATISTA, G. T. Utilização de geoprocessamento para a implantação de uma barragem na micro-bacia do rio da Antas, Taubaté – SP. Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Curitiba, PR, Brasil, 30 de abril a 05 de maio de 2011, INPE p.1327.