

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**

**Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas - Mestrado  
Profissional**

]

Autor: Jonas de Oliveira Laranjeira

**Avaliação do potencial espeleológico na Serra do Gandarela e apresentação em  
ambiente 3D, a partir de métodos de geoprocessamento aplicado à segurança e avaliação  
ambiental de atividades minerárias**

Belo Horizonte

Outubro/2021

Jonas de Oliveira Laranjeira

**Avaliação do potencial espeleológico na Serra do Gandarela em ambiente 3D, a partir de métodos de geoprocessamento aplicado à segurança e avaliação ambiental de atividades minerárias**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas – Mestrado Profissional da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Benedito Casagrande

Coorientadora: Profa. Dra. Andréia Bicalho Henriques

Belo Horizonte

Outubro/2021

L318a

Laranjeira, Jonas de Oliveira .

Avaliação do potencial espeleológico na Serra do Gandarela e apresentação em ambiente 3D, a partir de métodos de geoprocessamento aplicado à segurança e avaliação ambiental de atividades minerárias [recurso eletrônico] / Jonas de Oliveira Laranjeira. – 2021.

1 recurso online (76 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Pedro Benedito Casagrande.

Coorientadora: Andréia Bicalho Henriques.

Dissertação (mestrado profissional) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 72-76.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia de minas - Teses. 2. Tecnologia mineral - Teses. 3. Gandarela, Serra do (MG) - Teses. 4. Gandarela (MG) - Geologia - Teses. 5. Geoprocessamento - Teses. 6. Modelagem geológica - Teses. 7. Espeleologia - Teses. I. Casagrande, Pedro Benedito. II. Henriques, Andréia Bicalho. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 622(043)



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**ESCOLA DE ENGENHARIA**  
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica,  
Materiais e de Minas da UFMG - Mestrado Profissional

U F *MG*

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL ESPELEOLÓGICO NA SERRA DO  
GANDARELA E APRESENTAÇÃO EM AMBIENTE 3D, A PARTIR  
DE MÉTODOS DE GEOPROCESSAMENTO APLICADO À  
SEGURANÇA E AVALIAÇÃO AMBIENTAL DE ATIVIDADES  
MINERÁRIAS**

**JONAS DE OLIVEIRA LARANJEIRA**

Dissertação de mestrado submetida à Comissão Examinadora designada pelo Colegiado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da UFMG – Mestrado Profissional da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas.

Aprovada em 19 de outubro de 2021.

Por:

Prof. Dr. Pedro Eenedito Casagrande (UFMG)  
Orientador

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Andreia Bicalho Henriques (UFMG)

Prof. Dr. Michel Melo Oliveira (UFMG)

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Ana Clara Mourao Moura (UFMG)

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Maria Giovana Parisi (UFMG)

À minha família, que sempre me apoiou; à toda a equipe da LB, também aos meus amigos da vida, da faculdade, do Bigode e do DGC.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, pelo total apoio, carinho e dedicação nessa trajetória. A minha mãe, Ercília, pelo incentivo e carinho e a meu pai, Benerval, por sempre me apoiar em minha jornada acadêmica e me ensinar a ter a persistência que fez ter força de seguir sempre em frente.

Ao professor Pedro Casagrande, pela orientação para o desenvolvimento deste trabalho e aos demais professores do curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais, que contribuíram diretamente para a consolidação dos conhecimentos adquiridos na minha graduação e mestrado. Agradeço também à professora Andréia, que viabilizou o andamento deste trabalho.

Aos amigos da faculdade e do colégio que estão presentes até hoje, em especial a aqueles que várias vezes me ajudaram em meu desenvolvimento acadêmico e profissional. Tomás Guru, Psycoco, Boldin, Luanzera, Vinão Guerreiro e nosso saudoso Fábio merecem um abraço especial nesse momento. Também um grande abraço a todo o pessoal do Varandas.

Agradeço também a meus colegas e sócios da LB Mineração e Serviços, empresa que estamos a construir com muito apreço e dedicação. À Seequent, empresa que disponibilizou o Leapfrog, de grande importância para esse trabalho e para meu dia a dia profissional. Também a todos os geólogos e profissionais que acreditaram em minha carreira, Luzimar, Daniel, ACM, Rick, André e Letícia.

A minha irmã, por seu carinho constante e dedicação inspiradora, aos meus amigos de colégio, em especial do Colégio Santo Antônio, pelos momentos de lazer no meio a tanto trabalho. A minha querida Ana, por ter me dado paz quando o mundo pareceu desabar.

Um abraço para os ex-jogadores de CS e para o Tomás Kilo, que me inspira ainda a viajar por esse mundo.

## RESUMO

Dentre os estudos de avaliação ambiental necessários para o licenciamento de empreendimentos de mineração, têm ganhado cada vez mais importância os estudos de avaliação das cavidades, no ramo da espeleologia. A Serra do Gandarela, localizada na porção nordeste do Quadrilátero Ferrífero, na região central do Estado de Minas Gerais, é um domínio geomorfológico alvo de constantes estudos relacionados ao tema, uma vez que possui fatores de interesse tanto ambiental como mineral. Um fator que demonstra o interesse ambiental é a existência do Parque Nacional do Gandarela, que abrange uma parte da serra e possui vasta geodiversidade, com centenas de cavidades registradas em arquivos de domínio público, pelo CECAV. As atividades de mineração na Serra do Gandarela estão expressas pelas minas de ferro na região além de demais dezenas de processos minerários existentes na área, registrados na ANM, fora de fase de lavra. A coexistência destes fatores: mineração e meio ambiente exige que sejam realizados estudos criteriosos na região, a esse respeito, para minimizar o impacto ambiental causado pelas atividades de mineração. Nesse sentido, o presente trabalho apresenta estudos cartográficos realizados, considerando os fatores mencionados na plataforma de modelamento geológico 3D Leapfrog®. A plataforma, originalmente desenvolvida para modelamentos geológicos na área de mineração, pode ser aproveitada para integralizar todos os dados espaciais, de forma que, sobrepondo um modelo geológico 3D, poderá se observar a disposição de estruturas de mineração, das cavidades, dos rios, dos mapas de declividade e todos os demais dados geográficos e topográficos de interesse. A união de tais informações em um modelo único permitirá fazer observações de forma a subsidiar interpretações em estudos de avaliação ambiental, em projetos de engenharia e também em projetos que visem a segurança de estruturas, como, por exemplo, as barragens de mineração, ocorrentes na região. O modelo elaborado será disponibilizado e, ao final do trabalho, serão apresentados perfis verticais das principais regiões de interesse, destacando-se os aspectos observados.

**Palavras-chave:** Avaliação Ambiental, Potencial Espeleológico, Serra do Gandarela, Geoprocessamento, Modelagem Geológica.

## **ABSTRACT**

Among the environmental assessment studies required for the licensing of mining projects, cave assessment studies in the field of speleology have gained increasing importance. Serra do Gandarela, located in the northern portion of the Quadrilátero Ferrífero, in the central region of the state of Minas Gerais, is a geomorphological domain that is the target of constant studies related to the subject, as it has factors of both environmental and mineral interest. A factor that demonstrates the environmental interest is the existence of the Gandarela National Park, which covers a part of the mountain range and has vast geodiversity with hundreds of cavities registered in public domain records by the CECAV. The mining activities in Serra do Gandarela are expressed by the iron mines in the region, in addition to dozens of mining processes existing in the area registered with the ANM outside the mining phase. The coexistence of these factors, mining and the environment, requires careful studies to be carried out in the region in this regard to minimize the environmental impact caused by mining activities. In this sense, the present work intends to present cartographic studies carried out considering the factors mentioned in the 3D geological modeling platform Leapfrog®. The platform, originally developed for geological modeling in the mining area, can be used to integrate all spatial data, so that by overlaying a 3D geological model, it is possible to observe the arrangement of mining structures, cavities, rivers, maps of slope and all other geographic and topographic data of interest. The union of such information in a single model will allow observations to be made in order to support interpretations in environmental assessment studies, in engineering projects and also in projects aiming at the safety of structures, such as mining dams, occurring in the region. The developed model will be made available and at the end of the work vertical profiles of the main regions of interest will be presented, highlighting the observed aspects.

**Keywords:** Environmental Assessment, Speleological Potential, Serra do Gandarela, Geoprocessing, Geological Modeling.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: QUADRILÁTERO FERRÍFERO COM DESTAQUE PARA A REGIÃO DA SERRA DO GANDARELA.....	12
FIGURA 2: ÁREAS DOS LIMITES GEOLÓGICOS DA SERRA DO GANDARELA E DO PARQUE NACIONAL DO GANDARELA.....	13
FIGURA 3: FORMAÇÃO DE DOLINAS POR COLAPSO E POR SUBSIDÊNCIA.....	14
FIGURA 4: PROCESSOS ANM NA ÁREA DE ESTUDO.....	16
FIGURA 5: MAPA DA REGIÃO DA SERRA E PARQUE NACIONAL DO GANDARELA, COM LOCALIZAÇÃO DAS CAVIDADES MAPEADAS E DISPONÍVEIS EM DADOS PÚBLICOS.....	17
FIGURA 6: LOCALIZAÇÃO DAS MINERADORAS NA ÁREA DE ESTUDO.....	18
FIGURA 7: MAPA GEOLÓGICO DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO (MODIFICADO DE ENDO ET AL. 2019A). O SINCLINAL DA SERRA DO GANDARELA É REPRESENTADO PELA LINHA VERMELHA. EM AZUL, O GRUPO ITABIRA, DE INTERESSE PARA O PRESENTE ESTUDO. NA HACHURA, A ÁREA DO PARQUE NACIONAL.....	22
FIGURA 8: PARTE DE INTERESSE DA COLUNA ESTRATIGRÁFICA DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO.....	23
FIGURA 9: SERRA DO GANDARELA E PARQUE NACIONAL DO GANDARELA.....	25
FIGURA 10: CAVIDADES PRESENTES NA REGIÃO DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO.....	28
FIGURA 11: REPRESENTAÇÃO DE UM ABISMO SEGUNDO APRESENTADO NA IS.....	29
FIGURA 12: ESQUEMA UTILIZADO NA IS PARA DIFERENCIAR CAVERNAS DE ABRIGOS.....	30
FIGURA 13: GÊNESE DE CAVIDADE POR PROCESSOS DE CANALÍCULOS, TÍPICOS DE AMBIENTES DE CANGA FERRUGINOSA.....	32
FIGURA 14: MODELOS CONCEITUAIS DE CLASSIFICAÇÃO DE DOLINAS CONFORME MECANISMOS GENÉTICOS.....	33
FIGURA 15 – MAPA ANM DA MINA DE GONGO SOCO.....	35
FIGURA 16 – MAPA ANM DA MINA DE BRUCUTU.....	36
FIGURA 17 - MAPA ANM DA MINA DO BAÚ.....	37
FIGURA 18: SISTEMA DE BARRAGENS A MONTANTE (VALERIUS, 2014).....	38
FIGURA 19: MAPA LITOLÓGICO UTILIZADO PARA A ELABORAÇÃO DO MAPA DE POTENCIAL FINAL.....	44
FIGURA 20: ESTRUTURAS CONSIDERADAS PARA O MAPA DE POTENCIAL.....	46
FIGURA 21: REDE DE DRENAGENS UTILIZADA PARA O CÁLCULO DO POTENCIAL ESPELEOLÓGICO.....	47
FIGURA 22: MAPA DE ELEVAÇÃO SEGUNDO A BASE ALOS PALSAR.....	49
FIGURA 23: MAPA DE DECLIVIDADE APÓS A APLICAÇÃO DA FERRAMENTA SLOPE E RECLASSIFICAÇÃO SEGUNDO OS PARÂMETROS DA EMBRAPA (1999).....	49
FIGURA 24: TOPOGRAFIA SRTM EXTRAÍDA ABERTA NO SOFTWARE.....	51
FIGURA 25: LITOLOGIAS DE INTERESSE E EXTENSÃO DA ÁREA DE MODELAGEM.....	52
FIGURA 26: LINHAS DE CONTATO TRAÇADAS SOBRE O MAPA, DE FORMA A RETRATAR AS LITOLOGIAS DE INTERESSE.....	53
FIGURA 27: INTERPOLAÇÃO DAS LINHAS EM PLANOS, SEGUINDO UM TREND PREFERENCIAL.....	53
FIGURA 28: ILUSTRAÇÃO DA FERRAMENTA DE GEORREFERENCIAMENTO UTILIZADA PARA VISUALIZAÇÃO DO MAPA DE POTENCIAL NO MODELO 3D.....	54
FIGURA 29: MAPA DE POTENCIAL ESPELEOLÓGICO LOCAL.....	56

FIGURA 30: MAPA ILUSTRANDO AS QUATRO ÁREAS DE INTERESSE SOBRE O MAPA DE POTENCIAL. .....	57
FIGURA 31: MAPA ILUSTRANDO O POTENCIAL ESPELEOLÓGICO NA SERRA DO GANDARELA. ....	58
FIGURA 32: RELAÇÃO DAS CAVIDADES EM ÁREAS DE MÉDIO, ALTO E MUITO ALTO POTENCIAL.	59
FIGURA 33: MAPA ILUSTRANDO O POTENCIAL ESPELEOLÓGICO NA REGIÃO DE GONGO SOCO...	60
FIGURA 34: MAPA ILUSTRANDO O POTENCIAL ESPELEOLÓGICO NA REGIÃO DE BRUCUTU. ....	61
FIGURA 35: MAPA ILUSTRANDO O POTENCIAL ESPELEOLÓGICO NA REGIÃO DO BAÚ. ....	63
FIGURA 36: MODELO GEOLÓGICO ELABORADO .....	64
FIGURA 37: MAPA DE POTENCIAL CONSIDERANDO OS CONTATOS DO GRUPO ITABIRA.....	64
FIGURA 38 – PERFIL REPRESENTATIVO DO POTENCIAL NO MODELO.....	65

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – DADOS PROCESSO ANM MINA DE GONGO SOCO .....	35
TABELA 2 – DADOS PROCESSO ANM MINA DE BRUCUTU .....	36
TABELA 3 – DADOS PROCESSO ANM MINA DO BAÚ.....	37
TABELA 4 – NOTAS ATRIBUÍDAS PARA CADA LITOLOGIA .....	44
TABELA 5 – NOTAS ATRIBUÍDAS PARA CADA ESTRUTURA .....	45
TABELA 6 – NOTAS ATRIBUÍDAS PARA PRESENÇA / AUSÊNCIA DE DRENAGENS. ....	46
TABELA 7: CLASSIFICAÇÃO DE RELEVO SEGUNDO METODOLOGIA DA EMBRAPA, DE ACORDO COM A DECLIVIDADE EM (%). ....	48
TABELA 8: NOTAS ATRIBUÍDAS DE ACORDO COM AS CLASSES DE DECLIVIDADE.....	48
TABELA 9 - TOTAL DE CAVIDADES POR POTENCIAL NA ÁREA DE ESTUDO .....	55
TABELA 10 - DISTRIBUIÇÃO DAS CAVIDADES POR POTENCIAL NA ÁREA DO PARQUE.....	58
TABELA 11 – DISTRIBUIÇÃO DE CAVIDADES POR POTENCIAL NA MINA DE BRUCUTU.....	61
TABELA 12 – TOTAL DE ÁREA POR POTENCIAL .....	65
TABELA 13 – NÚMERO DE CAVIDADES POR POTENCIAL .....	66
TABELA 14 – RELAÇÃO HECTARES POR CAVIDADES .....	66

## **LISTA DE NOTAÇÕES**

**ANM** – Agência Nacional de Mineração

**ESA** – European Spatial Agency

**EIA/RIMA** – Estudo de Impactos Ambientais / Relatório de Impacto ao Meio Ambiente

**SIG** – Sistemas de Informações Geográficas

**SRTM** – Shuttle Radar Topography Mission

**MDT** – Modelo Digital de Terreno

**CDM/DIR** – Diretoria Centro de desenvolvimento de Minério

**NA** – Nível D'Água

**RMR** – Rock Mass Rating

**RV** – Realidade Virtual

**DEM** – Modelo de Elevação Digital

**PARNA** – Parque Nacional

**UC** – Unidade de Conservação

**ICMBio** – Instituto Chico Mendes

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO</b> .....	12
2.1 Objetivo geral.....	20
2.2 Objetivos específicos.....	20
2.3 Relevância .....	21
<b>CAPÍTULO 3: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E CARTOGRÁFICA</b> .....	22
3.1 Aspectos geológicos.....	22
3.2 Serra do Gandarela e Parque Nacional do Gandarela .....	24
3.3 As cavidades naturais subterrâneas no contexto do estudo.....	25
3.3.1 Aspectos legais .....	27
3.3.2 Instrução de Serviços SEMAD n° 08/2017 .....	28
3.3.3 Processos de gênese de cavidades ferríferas e carbonáticas .....	31
3.4 Consultas a dados de interesse na Agência Nacional de Mineração.....	34
3.5 Legislação de segurança de barragens.....	38
3.6 SIG e análise multicritérios .....	39
3.7 Modelagem geológica 3D.....	41
<b>CAPÍTULO 4: METODOLOGIA</b> .....	42
4.1 Revisão teórica e construção do banco de dados cartográficos.....	42
4.2 Seleção da área de estudo.....	42
4.3 Análises cartográficas a serem realizadas .....	42
4.4 Considerações sobre a eficiência do método utilizado .....	43
4.5 Elaboração do mapa de potencial espeleológico local .....	43
4.5 Modelagem geológica 3D.....	51
4.6 Apresentação do mapa de potencial em plataforma 3D .....	54
<b>CAPÍTULO 5: RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	55
5.1 Mapa de potencial elaborado.....	55
5.2 Observação das áreas de interesse no mapa de potencial elaborado.....	56
5.3 Modelo geológico 3D elaborado .....	64
5.3 Apresentação integrada dos modelos.....	65
5.3 Análises estatísticas quantitativas Observou-se segundo os estudos de geoprocessamento que em toda a área totalizou um valor de 30.856 hectares. Desses as áreas estavam distribuídas da seguinte forma, segundo a Tabela 12: .....	65
<b>CAPÍTULO 6: CONCLUSÕES</b> .....	66
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	69

## CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

A Serra do Gandarela, localizada na porção nordeste do Quadrilátero Ferrífero, no Estado de Minas Gerais, é um sítio geológico, com uma das maiores geodiversidades da região (Passos, 2015). Trabalhos como o de Santos (2017) abordam a região como sendo detentora de rica e singular associação entre aspectos bióticos e abióticos, incluindo formações ferruginosas do Quadrilátero Ferrífero.

A Figura 1 ilustra um mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero, simplificado de Dorr (1969), com destaque para a Serra do Gandarela. O mapa simplificado abaixo foi retirado de Endo (2019).

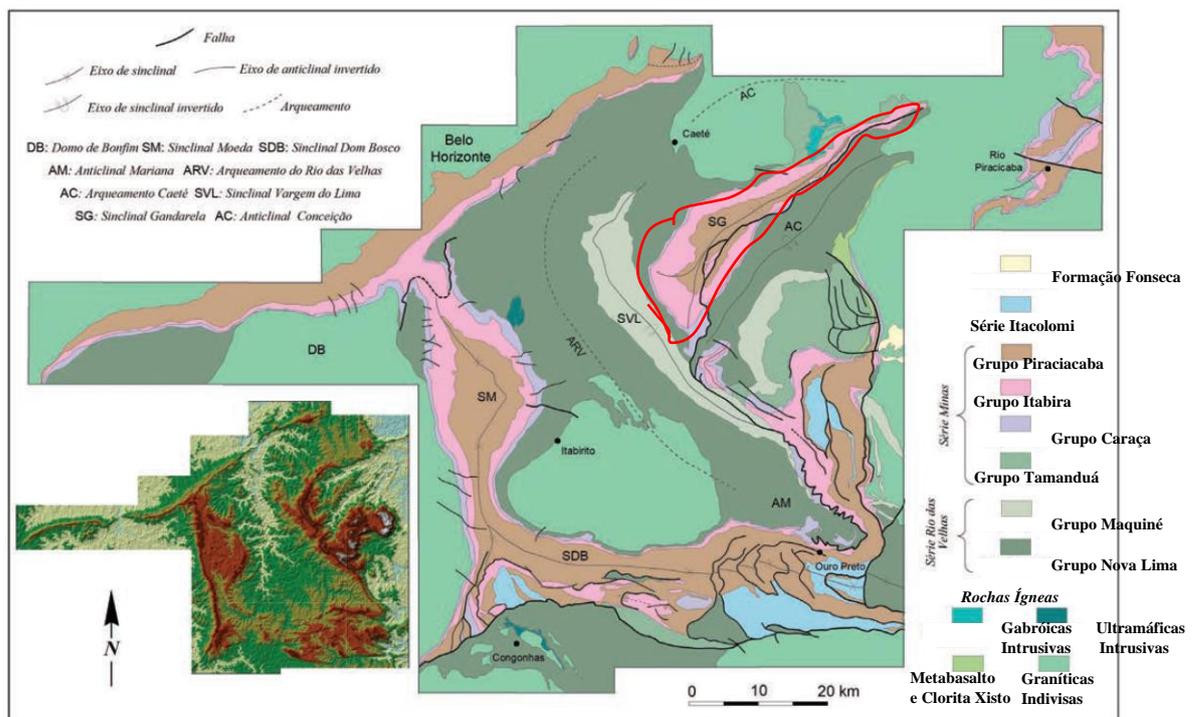


Figura 1: Quadrilátero Ferrífero com destaque para a região da Serra do Gandarela. Modificado de Endo (2019).

Dentre as grandes geodiversidades presentes na Serra do Gandarela, a de maior relevância para esta pesquisa são as cavidades naturais subterrâneas. Essas estão presentes nas litologias do Grupo Itabira, sendo de destaque as rochas Ferríferas da Formação Cauê e principalmente as rochas Calcário Dolomíticas da Formação Gandarela (Alkmin & Marshak, 1998). Devido a essa grande geodiversidade – variedade de elementos e de processos relacionados ao meio físico da natureza, sob diferentes formas e escalas (Zwolinski, 2004), encontradas na região, foi criado, pelo Decreto de 13 de outubro de 2014, o Parque Nacional da Serra do Gandarela, com

a extensão de 31.270,83 hectares e com o objetivo de se preservar as riquezas naturais presentes. Segundo Santos (2017), a área apresenta grande riqueza de elementos da geodiversidade, como recursos hídricos, sítios históricos, sítio paleoambiental e importante patrimônio espeleológico, com cavernas desenvolvidas em rochas carbonáticas, ferruginosas e siliciclásticas. A biodiversidade inclui vários endemismos de fauna e de flora, associados às fitofisionomias de cerrado e mata atlântica.

De forma a contextualizar a localização espacial do Parque Nacional da Serra do Gandarela (PARNA Gandarela) em relação aos limites geológicos da Serra do Gandarela, é apresentada a Figura 2. A imagem é georreferenciada em Datum Sirgas (2000), sobre a base cartográfica do mapa geológico do quadrilátero ferrífero representado por Endo (2019).

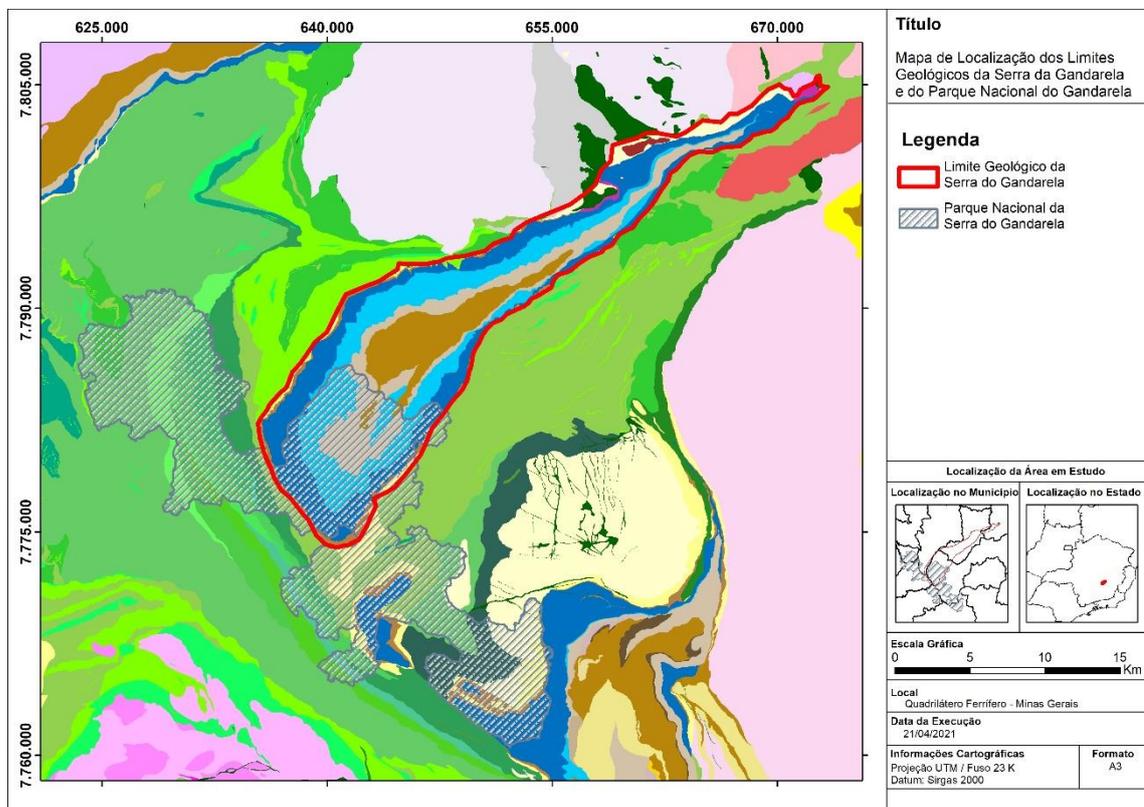


Figura 2: Áreas dos limites geológicos da Serra do Gandarela e do Parque Nacional do Gandarela.

Fonte: Endo (2019).

As cavidades naturais subterrâneas são feições geomorfológicas que podem se formar a partir de dissolução de íons em águas que percorrem fraturas de um corpo geológico (Branco, 2014) ou por erosão diferencial<sup>1</sup>. Conhecidas como feições cársticas, as cavidades podem, a partir de

<sup>1</sup> Erosão diferencial é um processo geomorfológico erosivo no qual dois tipos de substrato de solo ou rochoso são erodidos em uma mesma região, de forma que um se comporta de forma menos resistente às ações intempéricas do que outro.

seu colapso ou subsidência, formar outro tipo de feição, conhecidas como dolinas ou uvalas. O colapso se trata de um brusco movimento no terreno. A Figura 3, do curso básico de percepção e mapeamento do risco geológico da CPRM (Souza, 2018), ilustra o processo de formação de dolinas por subsidência e por colapso de cavidades por rebaixamento do nível d'água (NA).

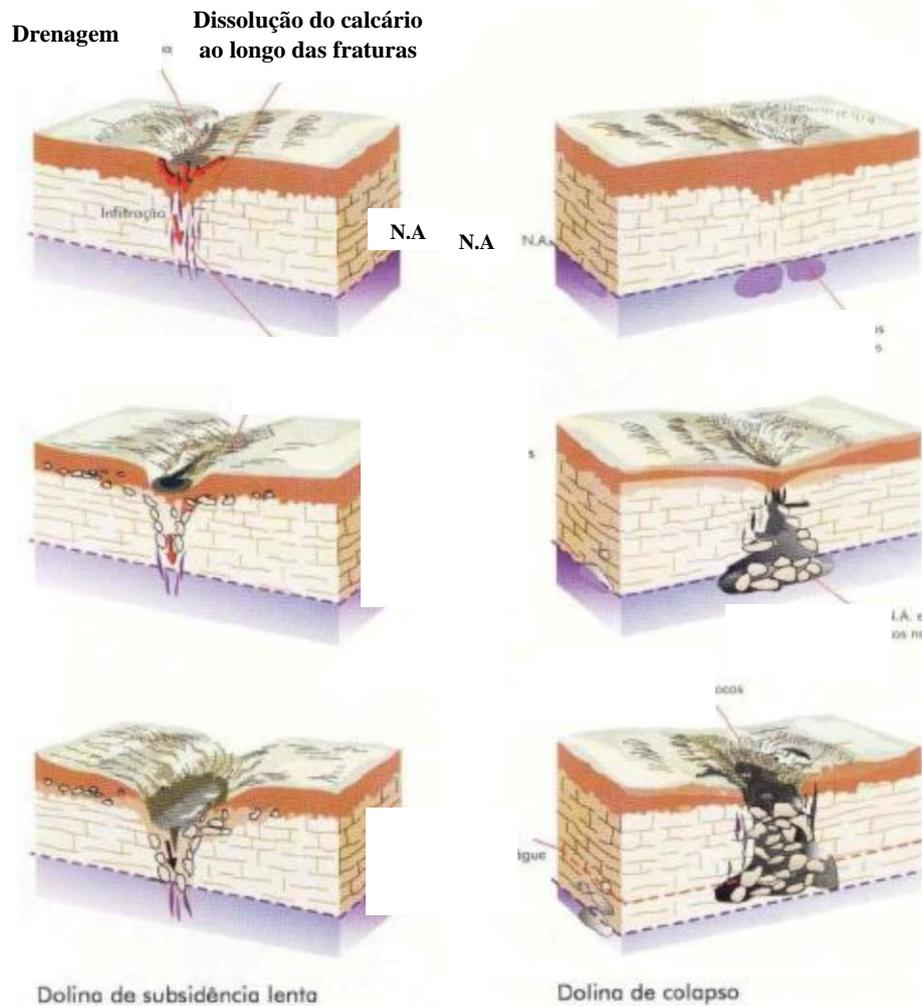


Figura 3: Formação de dolinas por colapso e por subsidência.  
Fonte: Adaptado de Souza (2018).

As cavidades são feições de relevância e fragilidade ambiental, sendo consideradas patrimônio da união. São feições geomorfológicas submetidas a processos naturais, como a formação de dolinas por colapso ou por subsidência (Souza, 2018). Ou seja, além de ser um objeto de interesse de preservação ambiental, também é um fator de relevância ao planejar estruturas de mineração, que podem apresentar riscos geotécnicos mediante processos de desestabilização do terreno. É evidente que barragens de rejeito, por exemplo, caso localizadas sobre zonas cársticas

instáveis, podem ser gravemente comprometidas em um caso de subsidência do terreno, podendo ser até mesmo ser um gatilho para seu rompimento total ou parcial.

Em uma análise histórica da legislação do tema, a Resolução do CONAMA nº 005/1987 foi a primeira legislação que tratou do assunto de cavidades no Brasil e implantou o Programa Nacional de Proteção do Patrimônio Espeleológico. A partir de então, várias evoluções na legislação foram implantadas, contando com maior destaque a Constituição Federal de 1988, que incluiu as cavidades naturais como bens da união; assim como o Decreto Federal nº 6.640 de 2008, que determinou que cavidades naturais de relevância máxima não podem ser alvo de impactos irreversíveis.

Segundo a Agência Nacional de Mineração (ANM), em consulta feita em 15/10/2020, também abriga diversas áreas de interesse para substâncias minerais, contando com dezenas de processos minerários vinculados à Agência Nacional de Mineração, nas mais diversas fases, inclusive de concessão de lavra.

Apesar da existência de requerimentos dentro da área do parque, por se tratar de uma Unidade de Conservação de Proteção Integral, não podem ocorrer atividades de mineração. Nas demais áreas da serra, fora do parque, a atividade de mineração é permitida.

Os processos minerários existentes na área são apresentados na Figura 4. As diferentes cores são relativas às diversas fases de cada processo, sendo as cores mais quentes aquelas relativas às fases mais avançadas.

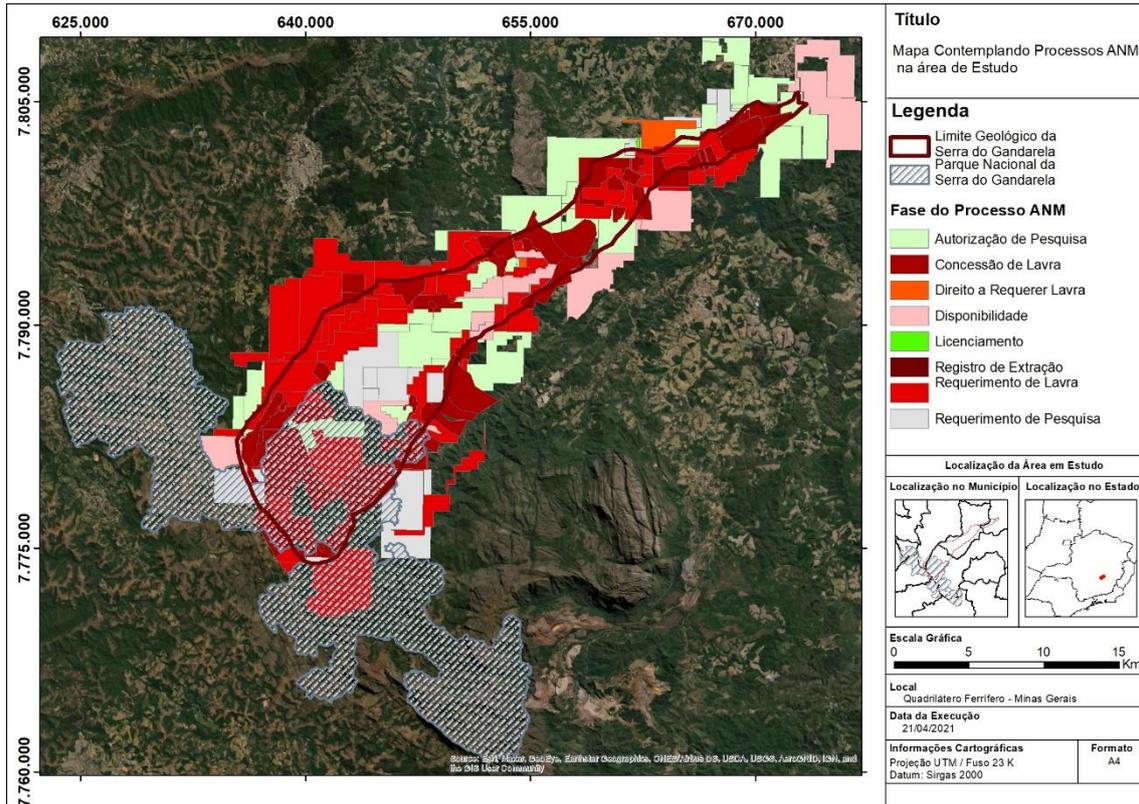


Figura 4: Processos ANM na área de estudo.

Fonte: Modificado de Sigmine. Acesso em 21/04/2021.

Na consulta realizada nos cadastros ANM, observa-se que existem processos minerários registrados desde 1961 na região. Cabe salientar que, por pelo menos 26 anos antes de qualquer legislação que exigisse o estudo e o registro de cavidades, já existiam ali atividades de mineração, regulamentada junto ao extinto Departamento Nacional da Produção Mineral (DNPM).

Entre os empreendimentos vinculados a esses registros de direito minerário, são encontradas minerações de grande porte, passíveis de licenciamento ambiental como Estudo de Impacto Ambiental / Relatório de Impactos ao Meio Ambiente (EIA/RIMA). Esses estudos de impactos ambientais exigem, após a legislação do Decreto Federal nº 6.640 de 2008, prospecção e registros de cavidades naturais subterrâneas. Exemplos conhecidos de grandes minas existentes na região são as de Gongo Soco e Brucutu, ambas operadas pela VALE S.A.<sup>2</sup>

<sup>2</sup> A Vale S.A. trata-se da maior companhia de mineração do Brasil, possuindo diversas áreas com portarias de lavra e decretos de mineração em diversas substâncias minerais, como ouro, ferro, cobre, entre outras.

Dados históricos relacionados às aberturas de minas a céu aberto no Estado de Minas Gerais datam ainda do século XIX, quando as barragens de rejeito eram construídas de forma rudimentar e sem o devido planejamento.

Em consulta aos dados do CECAV (acesso em 2021), observa-se que a região do Parque Nacional do Gandarela apresenta uma maior densidade de cavidades nos cadastros públicos em relação às demais porções da serra. Levanta-se, então, a questão de qual o motivo dessa mudança. Seria a área do parque mais rica em cavidades por fatores geológicos, por um maior esforço e divulgação nos estudos espeleológicos realizados na área do PARNA do que nas demais regiões ou ambos os casos? Será aqui apresentada uma discussão a esse respeito. Na Figura 5, a seguir, apresenta-se a distribuição das cavidades na região da serra e do parque.

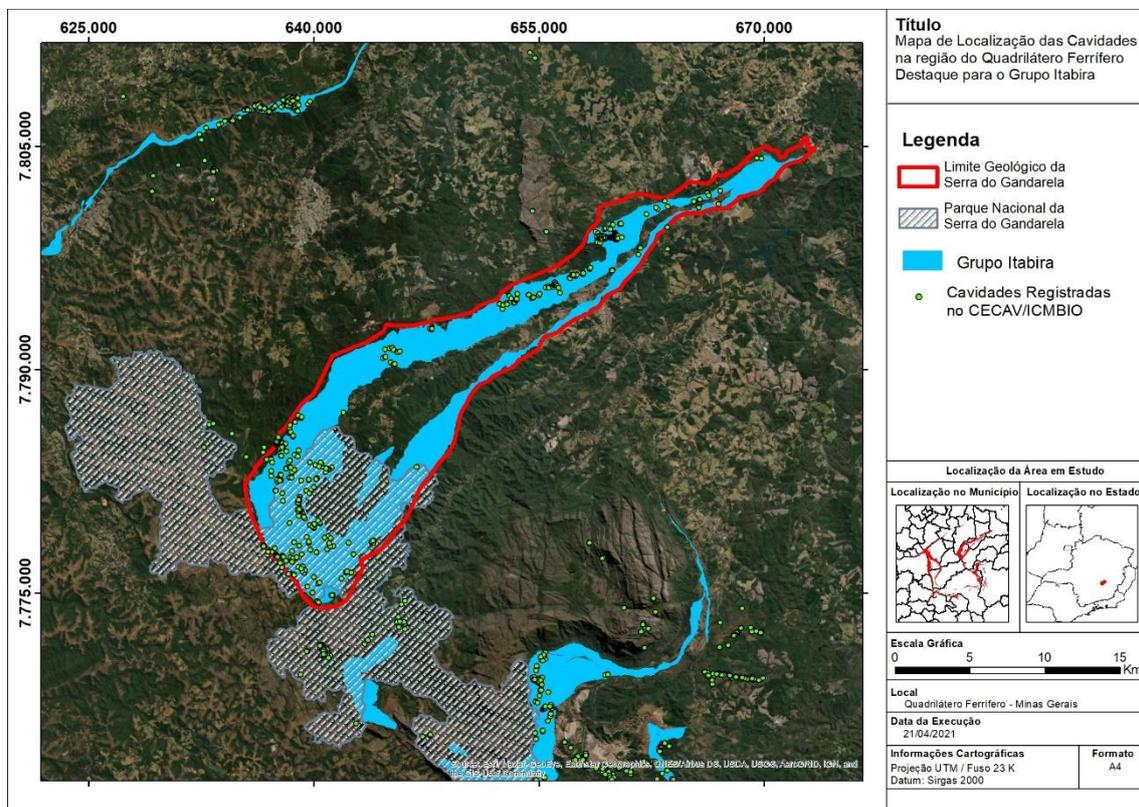


Figura 5: Mapa da região da Serra e Parque Nacional do Gandarela, com localização das cavidades mapeadas e disponíveis em dados públicos.

Fonte: Canie Acesso em 21/04/2021.

Também é relevante para o estudo de caso considerar a Resolução n° 13, de 08 de agosto de 2019, publicada no Diário Oficial da União, no dia 12/08/2019, pela Agência Nacional de Mineração. Essa resolução determinou que todas as barragens de mineração, cujo método de

construção seja aquele denominado como “a montante<sup>3</sup>”, devem ser descaracterizadas até a data de 15 de agosto de 2022. Tal determinação, exposta no Inciso II do Art. 4º da referida Resolução, causa uma série de desafios quanto aos métodos a serem utilizados para essa descaracterização, assim como preocupações relacionadas à segurança desses métodos. A importância dessa Resolução é relacionada com a relevância do presente estudo. Caso ocorram cavidades oclusas sob estruturas como essas, a desconsideração de sua existência pode ser um fator complicador geotécnico nesse processo de descomissionamento. A Figura 6 mostra a localização das mineradoras na área de estudo. Vale ressaltar que as minas de Gongo Soco e Brucutu são extrações de ferro de grande porte. A mina do Baú foi localizada na região por sensoriamento remoto e não possui estruturas permanentes de menor porte.

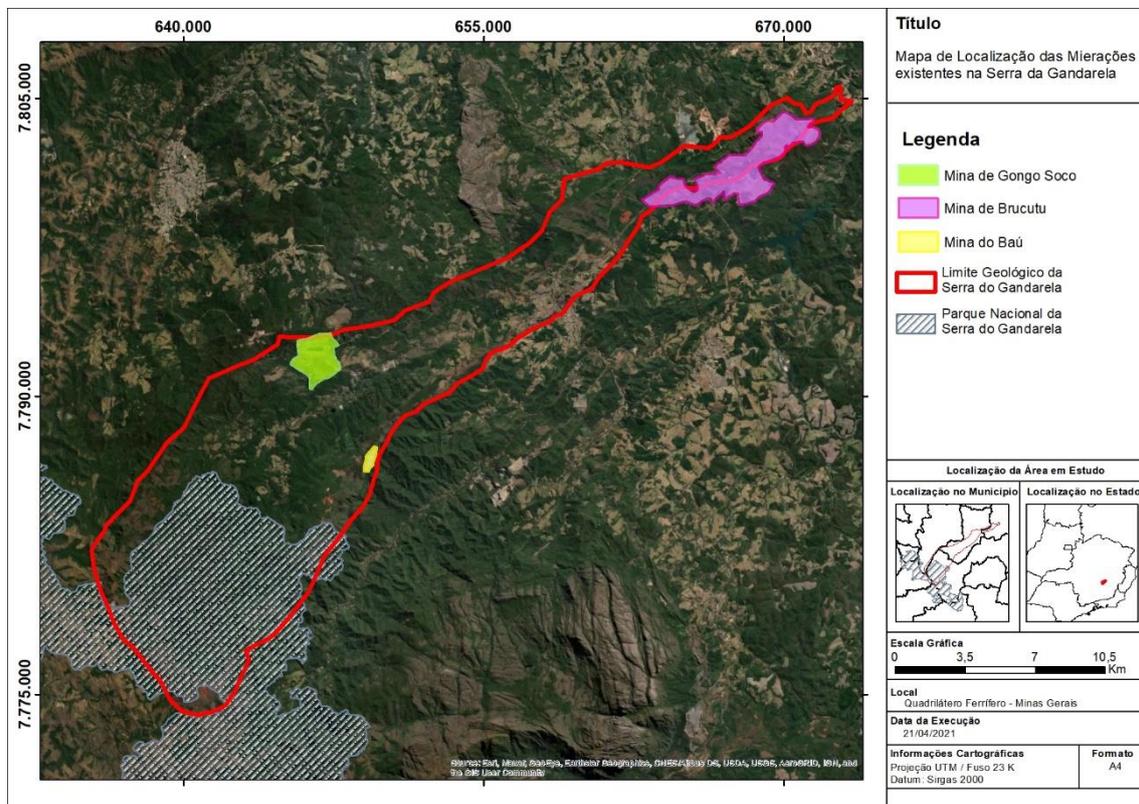


Figura 6: Localização das mineradoras na área de estudo.

No presente trabalho, é avaliado o potencial espeleológico de toda a região da Serra do Gandarela, tanto dentro quanto fora do parque. Para isso, serão utilizados os critérios indicados pelas legislações vigentes, valendo-se das ferramentas de geoprocessamento de forma criteriosa

<sup>3</sup> Segundo a mineradora Vale S.A., que opera várias áreas de mineração no Brasil e é a maior companhia no ramo, barragens a montante são aquelas em que o corpo da barragem é construído com o uso de rejeito, através de alteamentos sucessivos sobre o próprio rejeito depositado. Os alteamentos são realizados no sentido contrário ao fluxo de água (montante). A barragem necessita de rejeito grosso para que o maciço possa ser construído. Essas barragens são aquelas que apresentam os acidentes geotécnicos de maior magnitude, considerados os danos sociais e ambientais.

e justificada. As principais análises de geoprocessamento em ambiente de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) apresentadas serão a análise multicritérios por peso por evidências.

Os resultados obtidos inicialmente, por uma análise em *software* de mapeamento 2D, serão visualizados sobre um modelo geológico da área, elaborado no *software* de modelagem tridimensional, Leapfrog Geo®. O objetivo da visualização 3D é possibilitar observar perfis verticais de variação do potencial ao longo de serra, além da possibilidade da observação dinâmica do modelo. O modelo geológico criado para a área é adaptado para a situação de interesse a partir do mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero elaborado por Endo (2019).

Pretende-se observar como estão esses potenciais em regiões do parque e fora dele, de acordo com variações topográficas, geológicas, geomorfológicas e hidrográficas. Será dada uma atenção especial também para as áreas de minerações de grande porte e principalmente para as barragens de rejeito a montante.

Será debatida a densidade de ocorrência e a distribuição espacial das cavidades, considerados o potencial espeleológico assim como a sua condição e o contexto de ocorrência.

É esperado que os resultados mapeados e aqui apresentados possam ser utilizados para auxiliar em estudos de análise ambiental e geotécnica, para empreendimentos de mineração e demais empreendimentos da construção civil, na região da Serra do Gandarela.

## **CAPÍTULO 2: OBJETIVOS E RELEVÂNCIA**

O objetivo do presente trabalho é realizar uma análise espacial, apresentada em ambiente 3D, da Serra do Gandarela, do ponto de vista ambiental e geotécnico, considerando informações relacionadas à presença de cavidades registradas na área.

### **2.1 Objetivo geral**

Elaborar um modelo geológico 3D em Leapfrog Geo® da Serra do Gandarela, compilando bancos de dados que possibilitem análises diversas, tanto geológicas, quanto ambientais e geotécnicas.

A base de dados considerada para o modelo proposto conta com o mapa de potencial espeleológico da Serra do Gandarela, as cavidades cadastradas no CECAV, os mapeamentos geológicos realizados, os levantamentos topográficos disponíveis, as estruturas de mineração, as imagens de satélite e a rede hidrográfica.

### **2.2 Objetivos específicos**

#### **Elaboração do mapa de potencial**

Considerar, dentro dos métodos necessários, qual a melhor forma para se gerar e apresentar o mapa de potencial na região do estudo.

#### **Seleção dos parâmetros para a análise de pesos por evidências**

Considerações a respeito do peso de cada uma das feições para a análise multicritérios.

#### **Definir geograficamente o local das principais estruturas de mineração e barragens de rejeito existentes na Serra do Gandarela**

Demarcar geograficamente, em *software* por imagem de satélite, as estruturas de mineração de interesse para as análises desejadas.

#### **Modelagem geológica 3D da área de estudo**

Realização de um modelo 3D, representando as camadas de interesse (Formações Cauê e Gandarela).

### **Visualização integrada dos resultados em plataforma 3D e perfis verticais**

Realizar a sobreposição dos dados obtidos na análise multicritérios, assim como os pontos de cavidades encontradas em registros públicos sobre o modelo geológico 3D elaborado. Com essa sobreposição, é possível fazer uma correlação visual dos parâmetros adotados além de perfis verticais com as variações de relevo, altitude e litologias observáveis no modelo.

### **Levantamento das principais considerações a partir da análise realizada**

Destacar os aspectos mais relevantes observados a partir da análise integrada dos dados, para possíveis aprofundamentos futuros em cada tema.

### **2.3 Relevância**

O estudo é relevante ao fornecer os resultados de todo o banco de dados (mapa de potencial espeleológico juntamente às cavernas da região, imagens de satélite, mapa geológico, topografia, drenagens e estruturas de mineração), integrado em um modelo geológico 3D.

Além desse resultado estático, que pode ser explorado para os mais diversos fins, também serão levantados os principais aspectos observados a partir do modelo integrado. Essa análise será feita principalmente do ponto de vista ambiental e de segurança de barragens em mineração.

A escolha das estruturas de barragens para a análise foi feita devido à maior atenção que tem chamado o tema após o rompimento das barragens de Brumadinho, em 2016, e de Mariana, em 2013, operadas respectivamente pela Vale S.A. e pela Samarco.

Dentro desse contexto, e considerando o crescente consumo mundial por *commodities* minerais, torna-se um desafio para a mineração atender as metas de produção harmonicamente com questões técnicas, econômicas e ambientais, tendo em vista os significativos volumes de resíduos gerados.

A presença de cavidades na fundação ou próximas à fundação da barragem pode ser um complicador geotécnico, que deve ser considerado nas análises de estabilidade para processos de descaracterização de barragens, conforme o decreto da ANM.

Trata-se, então, de um estudo que subsidia, além de análises ambientais, também considerações sobre segurança geotécnica de barragens.

A legislação sobre o estudo de cavidades é posterior às atividades de mineração e encontra-se em um processo legal evolutivo. A exigência de descaracterização de barragens é legislada por exigência legal, imposta em 2019, pela Agência Nacional de Mineração.

## CAPÍTULO 3: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E CARTOGRÁFICA

### 3.1 Aspectos geológicos

#### 3.1.1 Geologia regional – Quadrilátero Ferrífero

Situado na borda Sul do Cráton São Francisco, na parte central do Estado de Minas Gerais, o Quadrilátero Ferrífero, primeiramente descrito por Dorr (1969), trata-se de uma das mais importantes províncias minerais do Brasil. Baltazar et al. (2005) divide a estratigrafia do Quadrilátero Ferrífero em quatro conjuntos maiores, como descritos na Figura 5, sendo elas: i) terrenos granito-gnaissicos arqueanos; ii) sequências vulcanossedimentares arqueanas, iii) sequências de coberturas sedimentares e vulcanossedimentares proterozóicas; e iv) coberturas sedimentares recentes.

Dentro do contexto do Quadrilátero Ferrífero, são de relevância para este estudo as rochas metassedimentares clásticas e químicas do Supergrupo Minas, mais especificamente, as formações Cauê e Gandarela (Endo, 2019) no mapa da Figura 7.

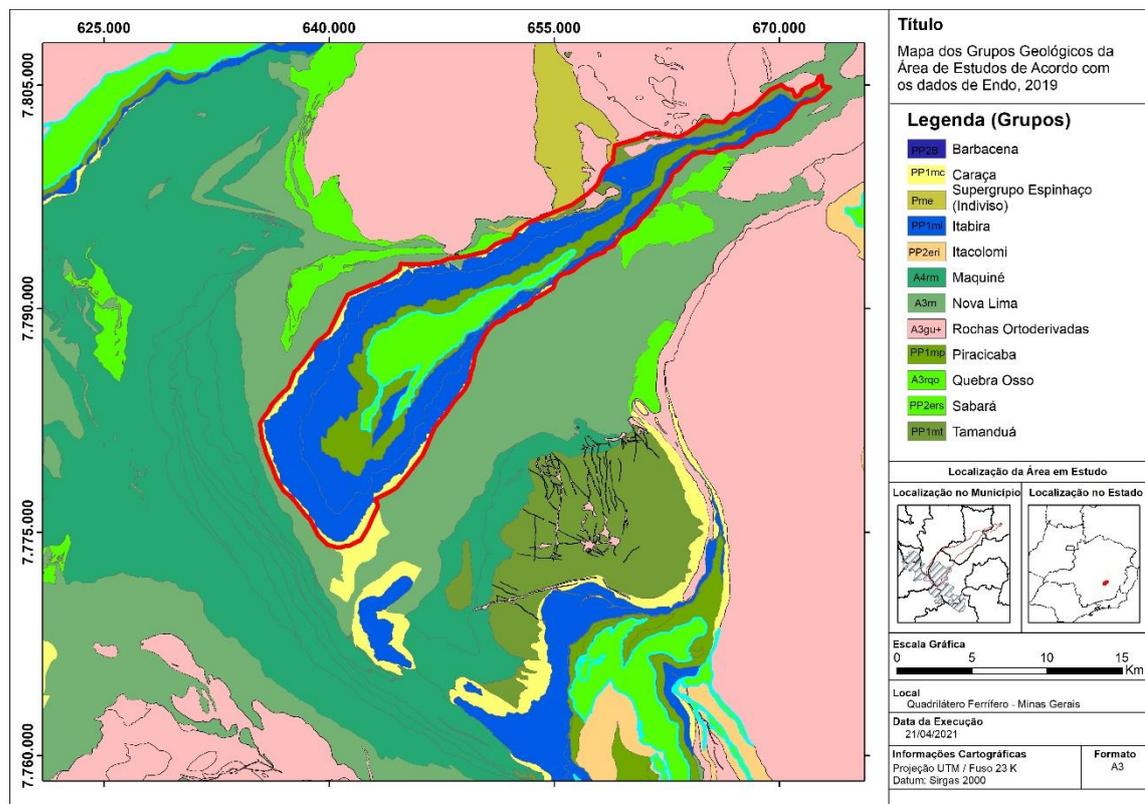


Figura 7: Mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero (modificado de Endo et al. 2019a). O sinclinal da serra do Gandarela é representado pela linha vermelha. Em azul, o Grupo Itabira, de interesse para o presente estudo. Na hachura, a área do parque nacional.

A Serra do Gandarela, região alvo deste estudo, situa-se na porção leste do Quadrilátero Ferrífero e, geologicamente, trata-se de um sinclinal (Baltazar et al., 2005). Como descrito pelo autor, a região é segmentada por cinturões e falhas de empurrão, atribuídas ao Ciclo Tectônico Brasileiro. Evidências de deformação transamazônica também estão presentes por cinturão de dobras-falhas de direção nordeste-sudoeste e vergência para noroeste. (Endo, 2019).

No ponto de vista litológico, as rochas de maior interesse tratam-se das formações Cauê e Gandarela, inclusas no Grupo Itabira, parte do Supergrupo Minas. Estão representadas na coluna estratigráfica a seguir, modificada da versão original, elaborada por Alkmin e Marshack (1998).

Devido a essa característica litológica e tectônica, foi formado um arcabouço litológico, com rochas calcárias e ferríferas repletas de discontinuidades, favorável à gênese de cavidades. A mais comum associa-se à dissolução e/ou lixiviação da sílica e/ou carbonato e/ou ferro (Pinheiro e Maurity, 1988). Nos casos de cavidades em canga e itabiritos, processos químicos ocorrem associados à erosão mecânica (Auler e Piló, 2005). Com a abertura inicial, têm início os processos de ampliação, principalmente por erosão, através de desabamentos sucessivos aliados à pequena contribuição química (dissolução e lixiviação).

As formações Cauê e Gandarela pertencem ao Grupo Itabira, com idade de 2,42Ga (Babinski et al., 1991, 1993), sendo a primeira composta por rochas predominantemente ferríferas e a segunda, por rochas calcárias e dolomíticas, litologias propensas à formação de cavidades.

A Figura 8 apresenta parte da coluna estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero segundo Endo (2019). As formações Cauê e Gandarela podem ser identificadas no Supergrupo Minas, como parte do Grupo Itabira.

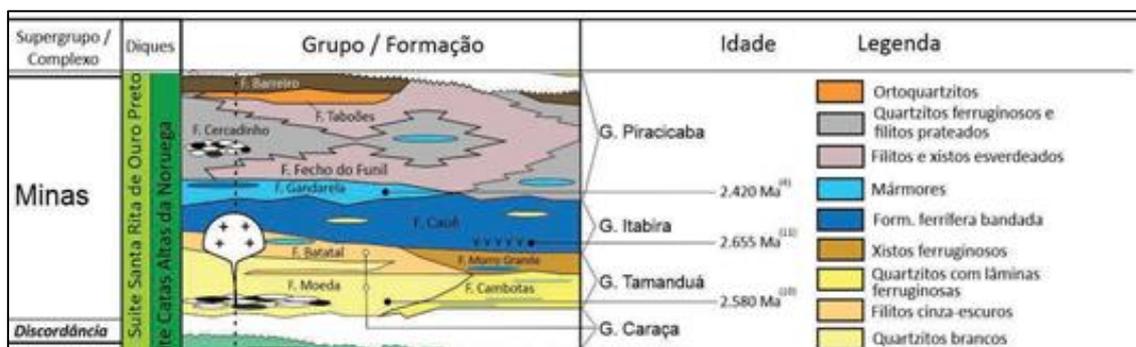


Figura 8: Parte de interesse da coluna estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero.

Fonte: Modificada de Endo (2019).

### 3.2 Serra do Gandarela e Parque Nacional do Gandarela

A vasta geodiversidade presente nas rochas da Serra do Gandarela e entorno fez com que, em 2014, fosse fundado o Parque Nacional do Gandarela, que engloba uma parte significativa da região. A riqueza do ambiente é descrita por Santos (2017):

O meio natural presente neste parque é composto por uma rica e singular associação entre aspectos bióticos e abióticos, incluindo amostras do geossistema ferruginoso do Quadrilátero Ferrífero, desenvolvido a partir de rochas do pré-cambriano, especialmente formações ferríferas bandadas e coberturas de canga. A área apresenta grande riqueza de elementos da geodiversidade como recursos hídricos, sítios históricos, sítio paleoambiental e importante patrimônio espeleológico, com cavernas desenvolvidas em rochas carbonáticas, ferruginosas e siliciclásticas. A biodiversidade inclui vários endemismos de fauna e de flora, associados às fitofisionomias de cerrado e mata atlântica.

Enquanto o Domínio Geológico da Serra do Gandarela é aquele definido pelo contexto geológico-estrutural do Sinclinal Gandarela (Endo, 2019), o parque Nacional do Gandarela, criado pelo Decreto de 13 de outubro de 2014, é uma região de 31.270,83 hectares, que abrange a porção oeste do domínio geológico do sinclinal e mais uma área considerável, situada em outro contexto geológico-tectônico estrutural.

O parque é uma área de conservação ambiental, localizada no Quadrilátero Ferrífero e na porção sul da Cadeia do Espinhaço, a 40 km de Belo Horizonte/MG. Entre suas riquezas naturais, estão exuberantes serras, rios e cachoeiras. A vegetação do local abriga um dos fragmentos mais contínuos da Mata Atlântica de Minas Gerais. Estão presentes campos rupestres ferruginosos e quartizíticos, vegetações de transição do cerrado. Por ser formado por rochas porosas que funcionam como importantes áreas para a infiltração de água das chuvas para os aquíferos, percolando os maciços rochosos, as águas do Parque contribuem para o abastecimento dos municípios vizinhos e até de Belo Horizonte. Toda essa riqueza está protegida em uma área ambiental. (ICMBIO, 2009).

A Figura 9 apresenta a área do Parque Nacional do Gandarela em relação à área da Serra do Gandarela.

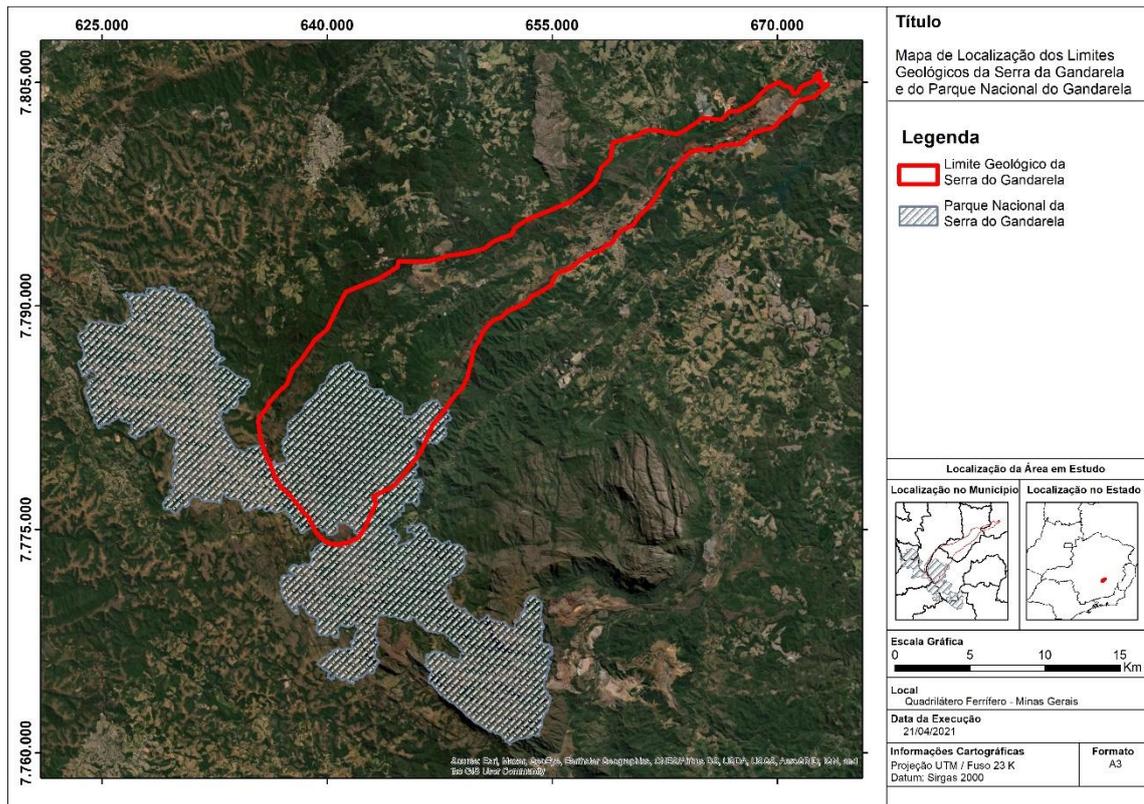


Figura 9: Serra do Gandarela e Parque Nacional do Gandarela.

Considerando o objetivo aqui proposto, será contemplada, neste trabalho, a área referente ao domínio geológico da Serra do Gandarela.

A área do parque será de suma importância para considerações que devem ser mais realistas ao cruzar o potencial espeleológico com a ocorrência de cavernas, devido à maior quantidade de estudos espeleológicos na região.

### 3.3 As cavidades naturais subterrâneas no contexto do estudo

As cavidades naturais subterrâneas, ou simplesmente cavernas, são feições naturais que se formam em diferentes tipos rochosos. O parágrafo único do Art. 1º do Decreto 9556/90 conceitua a cavidade natural subterrânea como

[...] todo e qualquer espaço subterrâneo penetrável pelo homem com ou sem abertura identificada, popularmente conhecido como caverna, incluindo seu ambiente, conteúdo mineral e hídrico, a fauna e a flora ali encontrados e o corpo rochoso onde os mesmos se inserem, desde que a sua formação haja ocorrido por processos naturais, independentemente de suas dimensões ou do tipo de

rocha encaixante. Nesta designação estão incluídos todos os termos regionais, tais como gruta, lapa, toca, abismo, furna e buraco.

Pelo texto do Decreto, vemos que diversas são as áreas que estudam as cavernas, incluindo a biologia, a geologia e o próprio direito, uma vez que tais feições são consideradas como patrimônio da União.

De forma a conciliar os interesses científicos e cênicos em meio à implementação dos mais diversos empreendimentos, tais como estradas, ferrovias, ocupações urbanas e minerações, existe um arcabouço em constante desenvolvimento, para tratar do licenciamento ambiental das atividades localizadas próximas às cavidades.

Os subcapítulos a seguir irão dispor sobre três diferentes aspectos de interesse. Primeiramente, é apresentada uma revisão sobre a legislação vigente sobre o tema. O segundo tópico abordado será um destaque para a Instrução de Serviços nº 08/2017, emitida pela Secretaria de Meio Ambiente de Minas Gerais (SEMAD/MG), que terá uma importância especial para o desenvolvimento do mapa de potencial apresentado mais adiante. O terceiro e último tópico será aquele que falará a respeito dos processos de gênese/formação de cavidades.

### 3.3.1 Aspectos legais

Segundo estudos realizados por Aquino (2011), a primeira vez que foi realizado algum passo em direção à conservação do patrimônio espeleológico no Brasil foi em 1986, quando, em razão de demandas da comunidade espeleológica, foi publicada a Resolução CONAMA n° 009/1986. Essa Resolução foi a responsável por criar uma comissão especial para tratar da preservação do patrimônio espeleológico no país.

Então, em 1987, foi sancionada a Resolução do CONAMA n° 005/1987, implantando o Programa Nacional de Proteção ao Patrimônio Espeleológico, que incluiu, na legislação ambiental do Brasil, a obrigatoriedade de Estudo de Impacto Ambiental (EIA) nos casos potencialmente lesivos ao patrimônio espeleológico nacional (Noce, 2016).

A Constituição Federal, promulgada em 1988, incluiu as cavidades naturais subterrâneas como bens da união, sendo necessária a proteção, preservação e conservação das mesmas. Em 1990, com a publicação do Decreto Federal n° 99556, o IBAMA (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis) foi incumbido de fiscalizar e controlar o uso desse patrimônio espeleológico. Em 1997, foi instituído o CECAV (Centro Nacional de Estudo, Proteção e Manejo) para tratar estritamente dos processos envolvendo o patrimônio espeleológico.

Até então, todo o patrimônio espeleológico, assim como sua área de influência, não era passível de sofrer impactos ambientais irreversíveis. Na época, essa área era definida como “área que compreende os elementos bióticos e abióticos, superficiais e subterrâneos, necessários à manutenção do equilíbrio ecológico e da integridade física do ambiente cavernícola”. A Resolução do CONAMA 347/2004, então, além de instituir o Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas – CANIE, define que, até se realizarem estudos específicos, a área de influência das cavidades é dada pela projeção horizontal da caverna somada a um *buffer* (área acrescentada ao entorno da feição georreferenciada) de 250 metros (Noce, 2016).

No ano de 2008, houve uma outra grande revolução na legislação referente a cavidades, devido a empreendimentos diversos, destacando-se a mineração, que sofria várias penas, devido à inflexibilidade legislativa no tocante ao tema. Com a pressão feita, principalmente advinda de grandes mineradoras, foi sancionado o Decreto 6.640, que permite classificar as cavernas de acordo com um grau de relevância, que pode estar no espectro de baixo, médio, alto ou máximo grau. Os critérios que orientam a classificação do grau de relevância das cavidades naturais subterrâneas encontram-se dispostos no Decreto n° 99.556/90 (com nova redação oferecida pelo

Decreto nº 6.640/2008) e na Instrução Normativa nº 02/2017 do Ministério do Meio Ambiente, que detalha a metodologia aplicável por esse instrumento. As cavernas de grau máximo e sua área de influência não podem sofrer impactos negativos irreversíveis e as demais podem, desde que realizadas as medidas compensatórias impostas para cada grau de relevância. Para a definição do grau de relevância de uma cavidade, devem ser considerados parâmetros de atributos físicos, bióticos e socioeconômicos de cada cavidade, dentro de um contexto local e regional.

Atualmente, todos os dados públicos de cavidades já registradas estão disponibilizados gratuitamente, nos cadastros *online* do CANIE, disponibilizados pelo CECAV. A Figura 10 apresenta a distribuição de cavidades segundo os dados do CECAV, no Quadrilátero Ferrífero.

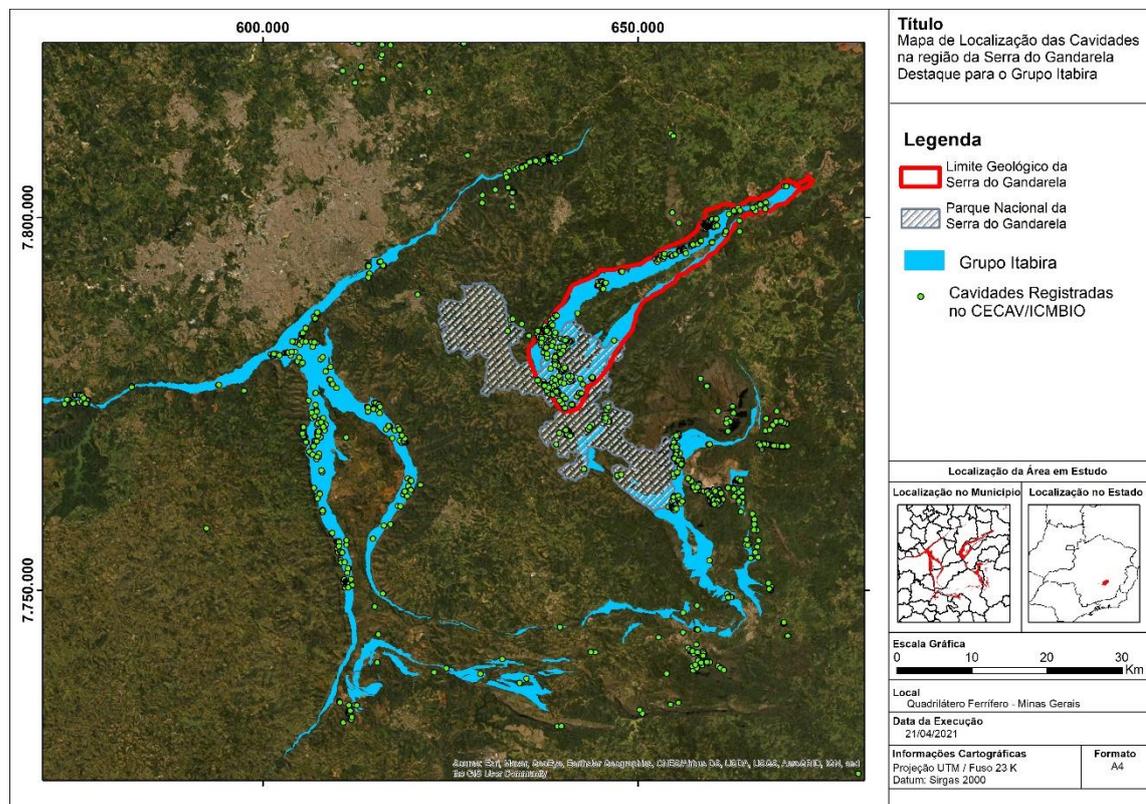


Figura 10: Cavidades presentes na região do Quadrilátero Ferrífero.  
Fonte: CECAV (2021).

### 3.3.2 Instrução de Serviços SEMAD nº 08/2017

No Estado de Minas Gerais, a legislação mais atual sobre o tema trata-se da Instrução de Serviços nº 08/2017 da Secretaria de Estado de Meio-Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (SEMAD). A legislação do Estado está em sua primeira revisão e delimita a metodologia de

execução de todos os serviços relacionados a como se desenvolver estudos relacionados ao patrimônio espeleológico no Estado de Minas Gerais.

A instrução utiliza da definição de Ganem (2009) e Miranda (2012), que dispõe sobre as cavidades:

Conhecidas como cavernas, constituem um ecossistema sensível, complexo e de considerável fragilidade ambiental em razão das peculiaridades de seu ambiente, podendo abranger formações morfológicas (espeleotemas), reservatórios de água, espécies endêmicas e vestígios paleontológicos e arqueológicos.

Define ainda três tipos de cavidades naturais subterrâneas distintas, sendo:

**Abismo:** É uma depressão natural no relevo, com desenvolvimento predominantemente vertical, como ilustrado na Figura 11.

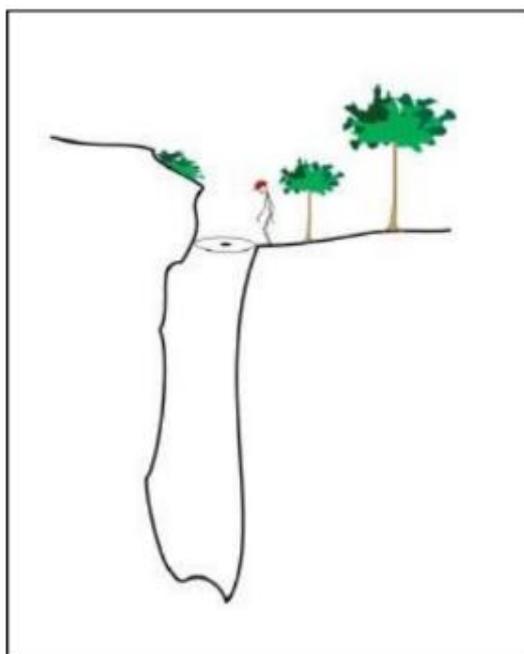


Figura 11: Representação de um abismo segundo apresentado na IS.  
Fonte: Curso de “Espeleologia e Licenciamento” – Cecav/ICMBio.

**Abrigo:** Feição cárstica ou pseudocárstica, que possui altura da entrada maior que seu desenvolvimento linear ( $A > PH$ ). Os abrigos que não possuem característica de ambiente subterrâneo não devem ser considerados como cavidade natural subterrânea, não obstante serem objeto de estudos arqueológicos pelo órgão competente.

**Cavidade natural subterrânea:** Entende-se por cavidade natural subterrânea “todo e qualquer espaço subterrâneo penetrável pelo ser humano, com ou sem abertura identificada,

popularmente conhecido como caverna, gruta, lapa, toca, abismo, fuma e buraco, incluindo seu ambiente, seu conteúdo mineral e hídrico, as comunidades bióticas ali encontradas e o corpo rochoso onde as mesmas se inserem, desde que sua formação tenha sido por processos naturais, independentemente de suas dimensões ou do tipo de rocha encaixante”. (conf. Inciso I do Art. 2º da Res. Conama nº 347/2004).

A Figura 12 ilustra a diferença entre caverna e abrigo, de acordo com a altura da entrada e a projeção horizontal<sup>4</sup> do desenvolvimento.

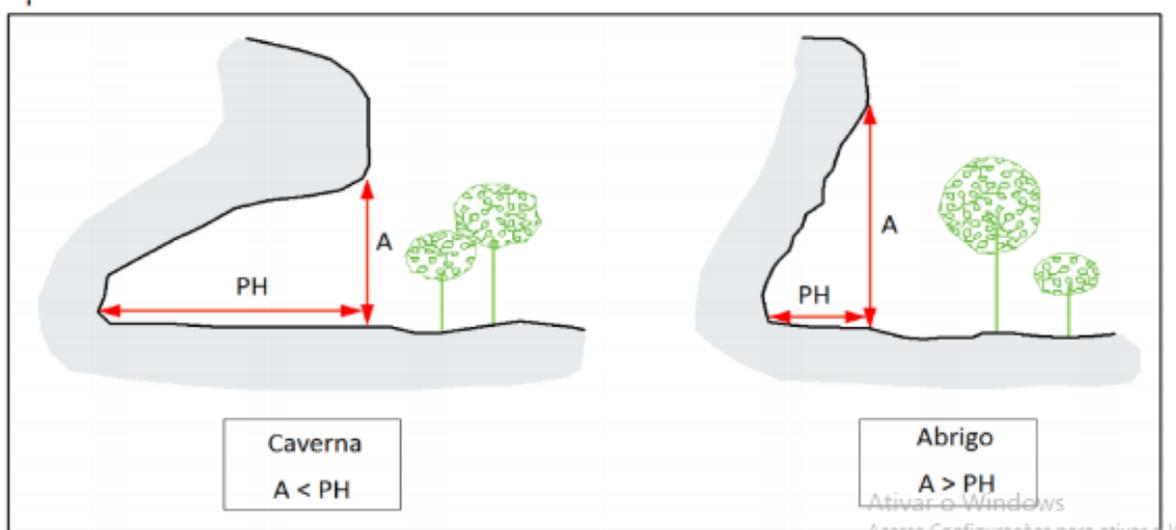


Figura 12: Esquema utilizado na IS para diferenciar cavernas de abrigos.

Após as definições iniciais, a Instrução de Serviços trata dos procedimentos a serem levados em conta ao realizar atividades de licenciamento ambiental de atividades e empreendimentos que possam, em potencial, causar impactos negativos irreversíveis.<sup>5</sup>

Para tal, a Instrução discursa sobre temas como a avaliação de impactos sobre as cavidades e o estudo do potencial espeleológico teórico de uma determinada região. Segundo o texto, a avaliação dos impactos deverá ser realizada considerando a atividade objeto do licenciamento ambiental, independentemente da quantidade de cavidades existentes na área total do empreendimento.

O potencial espeleológico deverá ser avaliado considerando, no mínimo, os seguintes parâmetros: litologia, estruturas geológicas, hidrografia, declividade, hipsometria e feições

<sup>4</sup> Soma do comprimento do eixo central do conduto, sem considerar a largura do mesmo.

<sup>5</sup> Intervenção antrópica em cavidade natural subterrânea ou em sua área de influência, que implique a sua supressão total ou alteração parcial não mitigável do ecossistema cavernícola, com o comprometimento da sua integridade e preservação (conf. Inc. II do Art. 3º da IN ICMBio nº 1/2017).

geomorfológicas. A metodologia utilizada para elaboração do mapa de potencial espeleológico deverá também ser apresentada em detalhes.

Segundo a Instrução Normativa SEMAD nº 08/2017, os seguintes itens devem ser apresentados e considerados no planejamento da prospecção espeleológica:

- Levantamento bibliográfico através da consulta a artigos científicos, livros, processos de licenciamento ambiental e bases de dados oficiais de cadastro de cavidades (CANIE/CECAV, Cadastro Nacional de Cavernas/SBE, CODEX/Redespeleo, IDE, dentre outros);
- Mapas geológicos, hipsométricos, litológicos e imagens de satélite ou aerofotométricas da área de estudo;
- Mapa do potencial espeleológico da área de estudo, com representação cartográfica adequada e em escala compatível com a área do empreendimento (escala local). O potencial espeleológico deverá ser avaliado considerando, no mínimo, os seguintes parâmetros: litologia, estruturas geológicas, hidrografia, declividade, hipsometria e feições geomorfológicas. A metodologia utilizada para elaboração do mapa de potencial espeleológico deverá também ser apresentada em detalhes.

### **3.3.3 Processos de gênese de cavidades ferríferas e carbonáticas**

Cavidades naturais subterrâneas podem ter diferentes processos genéticos para sua formação. Em geral, passam por processos de dissolução, mas também podem ser levadas a ocorrer por outros fatores, como erosão diferencial ou depósitos de tálus. Trataremos aqui das principais formas de gêneses de cavidades ferríferas em canga e de cavidades carbonáticas.

Segundo Auler (2015), as rochas apresentam diferentes potenciais para a ocorrência de cavidades naturais, sendo a água o fator primordial para o desenvolvimento das mesmas. Em alguns casos menos comuns, elas se formam pelo acúmulo de blocos (depósito de tálus). As rochas carbonáticas, mais propensas a processos de dissolução em contato com a água ácida, tendem a apresentar maior número de cavernas. Rochas siliciclásticas apresentam potencial para dissolução química muito inferior àquelas carbonáticas e, nesse caso, o processo espeleogenético mais significativo é a erosão, por meio da remoção dos grãos de quartzo constituintes da rocha. No caso das rochas ferruginosas, o processo para formação de cavernas é extremamente lento e envolve reações químicas, erosão mecânica e por ação de atividades bióticas.

### ***Gênese de cavidades em canga***

Como mencionado na sessão anterior, as cavidades desenvolvidas em cangas ferruginosas envolvem uma combinação de fatores de ação química de dissolução com fatores erosivos e atividades bióticas. Simmons (1963) afirma que as cavidades desenvolvidas em rochas ferruginosas são resultantes de processos erosivos e de dissolução, bem como pela combinação desses processos. Embora não tenha discorrido especificamente sobre a gênese de cavidades em rochas ferríferas, Dorr (1969) aponta que a canga passa por processos de erosão mecânica somente por baixo de suas bordas, onde ocorrem rochas mais propensas ao intemperismo. Isto decorre do fato de a canga ser praticamente inerte ao intemperismo químico e muito resistente ao intemperismo mecânico.

A Figura 13 a seguir, extraída de Santos (2017), ilustra um típico processo de gênese de cavidade em canga, observado na própria Serra do Gandarela.

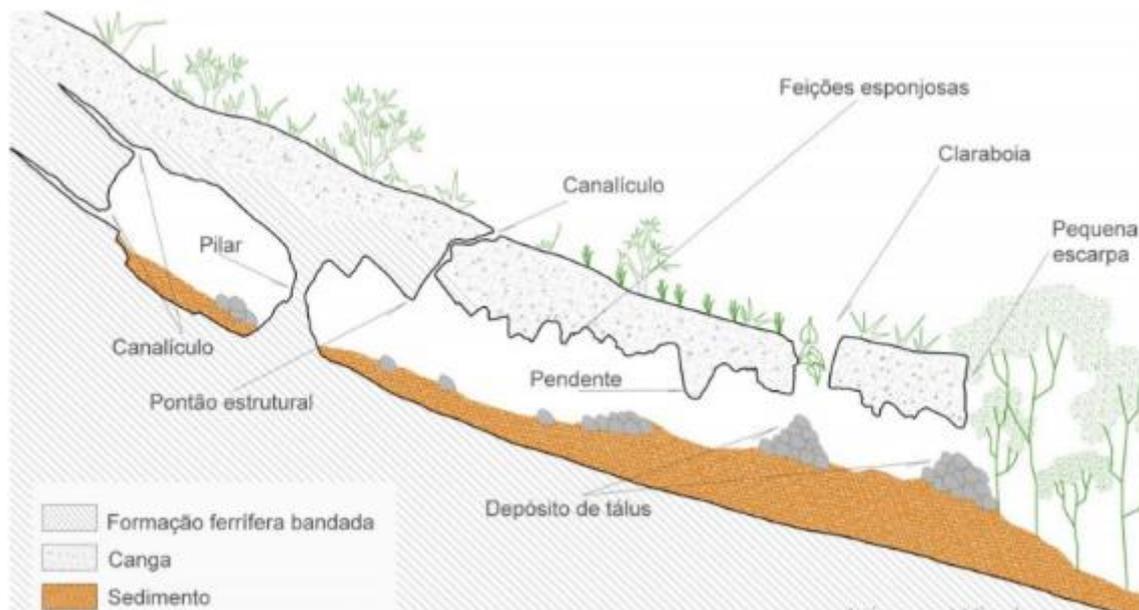


Figura 13: Gênese de cavidade por processos de canaliculos, típicos de ambientes de canga ferruginosa.

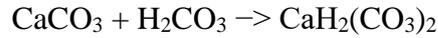
Fonte: Piló et al. (2015).

### ***Gênese de cavidades carbonáticas***

As cavernas carbonáticas têm seu principal processo de formação pela dissolução das rochas calcárias. Segundo Branco (2014), a calcita se torna um carbonato de cálcio solúvel em água se essa água absorver pequenas quantidades de dióxido de carbono para formar ácido carbônico, segundo a fórmula:



Esse fato basta para que a água dissolva facilmente o carbonato de cálcio, segundo a reação:



Por ser uma rocha abundante fraturas, à medida que a água dissolve a rocha, as fraturas são aberturas e com isso mais água pode ali penetrar, criando um processo cada vez mais acelerado. Esse processo pode gerar cavernas de morfologias complexas, com diversos níveis horizontais, que podem se interligar verticalmente, através de trechos inclinados ou mesmo de abismos internos. Alguns desses níveis podem estar inundados, enquanto os níveis acima deles estão secos. (Branco, 2014).

Travassos (2019) apresenta, em seu trabalho divulgado com o apoio do ICMBio, em 2019, um compilado de trabalhos sobre cavernas carbonáticas. Cita, entre os importantes processos de gênese de cavidades carbonáticas os dolinamentos, seis tipos principais de dolinamentos, sintetizados por Williams (2004): 1) as de dissolução, 2) as de colapso ou abatimento, 3) as encobertas ou enterradas, 4) as encobertas por rocha (*caprock doline*), 5) as de sufusão e 6) as de “abandono” (*dropout*).

A Figura 14 ilustra os processos mencionados de formação de dolinas.



Figura 14: Modelos conceituais de classificação de dolinas conforme mecanismos genéticos. (Adaptados de WALTHAM; FOOKES, 2003, p. 106; WALTHAM, 2008b, p. 292).

Não entraremos aqui em detalhes sobre cada um desses processos de dolinamentos. O que mais nos interessa nesse caso é mostrar a possibilidade de diversos tipos de potenciais instabilizações

no terreno, que ocorrem durante a formação de tais feições cársticas. Tais instabilizações podem comprometer estruturas de mineração ou de engenharia em geral. Devido a isso, a proximidade de zonas carstificadas a estruturas de mineração, tais como barragens de rejeito, deve significar um sinal de alerta.

### **3.4 Consultas a dados de interesse na Agência Nacional de Mineração**

A Agência Nacional de Mineração (ANM), ainda conhecida pelo seu antigo nome, DNPM (Departamento Nacional de Produção Mineral), é o órgão regulador federal responsável pela gestão dos direitos minerários, sejam eles nos regimes de licenciamento, concessão ou de pesquisa.

O site oficial da Agência Nacional de Mineração disponibiliza uma consulta de processos minerários. A consulta pode ser feita de diversas maneiras, sendo duas as mais relevantes para a presente pesquisa: a consulta espacial, a partir do SIGMINE (Sistema de Informações Geográficas da Mineração); e a pesquisa por número de processo, no Cadastro Mineiro.

Os dados do SIGMINE podem ser adquiridos em formato *Shapefile* e *Kml*, onde é possível se consultar dados como o georreferenciamento espacial e o número de cada processo. No Cadastro Mineiro, então, ao consultar o processo, é possível se ter acesso a todos os dados públicos que dizem sobre as movimentações processuais e a fase em que se encontra cada processo minerário relacionado.

As principais atividades de mineração encontradas foram as da Mina de Gongo Soco, Mina de Brucutu e Mina do Baú.

A seguir, serão apresentados mapas situacionais das cavas em relação aos referidos processos minerários.

## Mina de Gongo Soco

Abaixo, na Tabela 1 e na Figura 15 estão apresentados os principais dados do processo minerário de Gongo Soco juntamente a um mapa de localização com a indicação das cavernas próximas.

Número do Processo ANM	1.791/1961
Ano do Processo	1961
Tipo do Processo	Decreto de Lavra
Titular	Vale S.A.
Área	288,1ha

Tabela 1 – Dados Processo ANM Mina de Gongo Soco

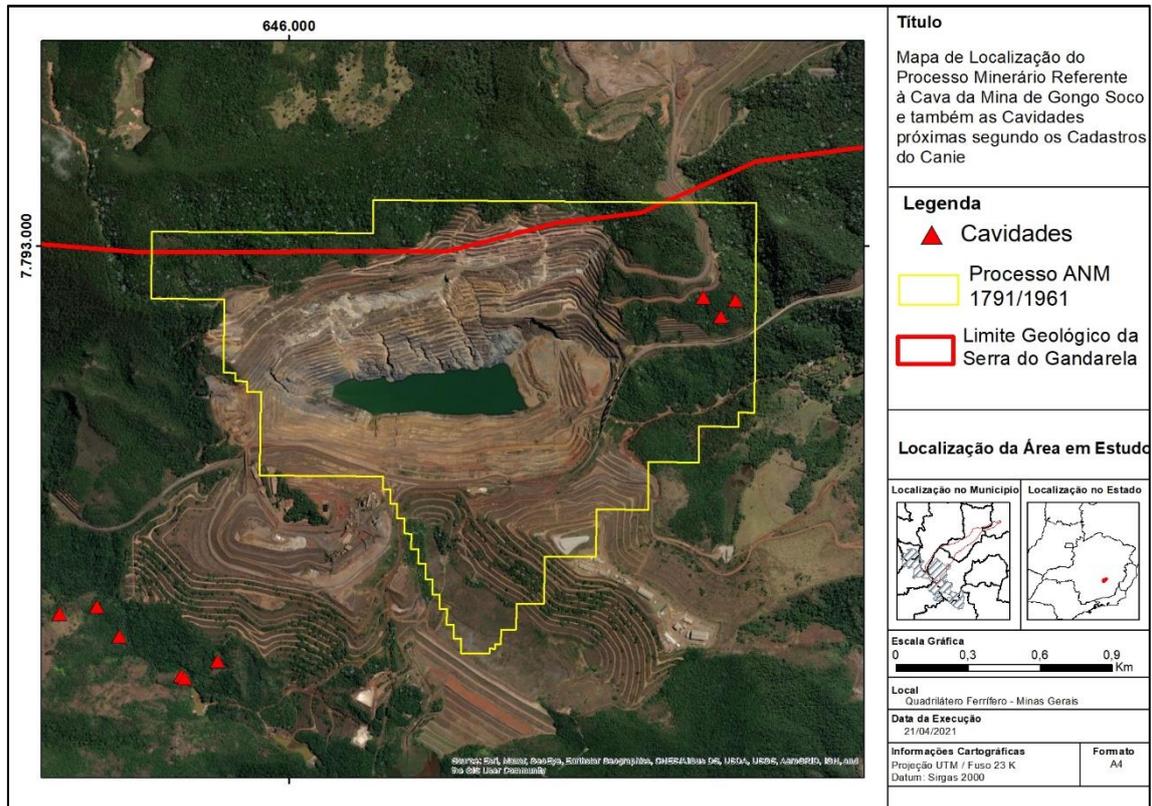


Figura 15 – Mapa ANM da Mina de Gongo Soco

## Mina de Brucutu

Abaixo, na Tabela 2 e na Figura 16 estão apresentados os principais dados do processo minerário de Brucutu juntamente a um mapa de localização com a indicação das cavernas próximas.

Número do Processo ANM	8.337/1960
Ano do Processo	1960
Tipo do Processo	Decreto de Lavra
Titular	Vale S.A.
Área	447,95ha

Tabela 2 – Dados Processo ANM Mina de Brucutu

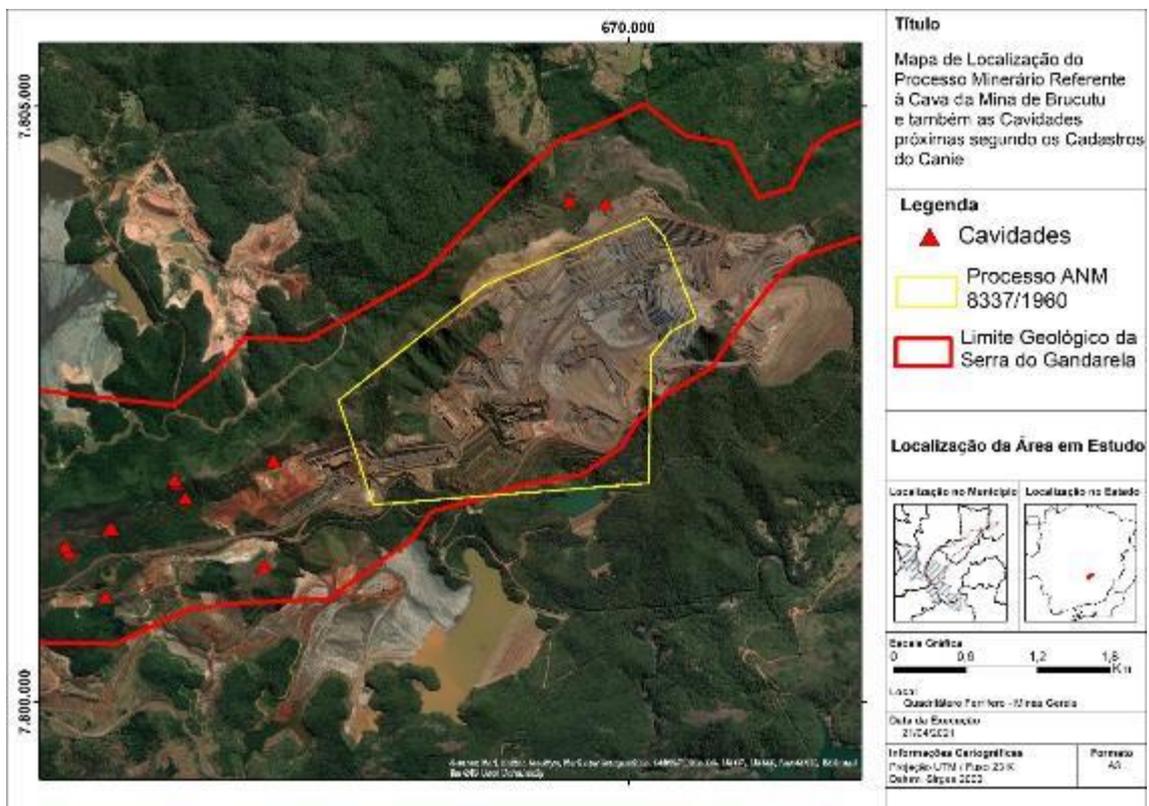


Figura 16 – Mapa ANM da Mina de Brucutu

## Mina do Baú

Abaixo, na Tabela 3 e na Figura 17 estão apresentados os principais dados do processo minerário de Gongo Soco juntamente a um mapa de localização com a indicação das cavernas próximas.

Número do Processo ANM	847/1935
Ano do Processo	1935
Tipo do Processo	Decreto de Lavra
Titular	Vale S.A.
Área	458,47

Tabela 3 – Dados Processo ANM Mina do Baú

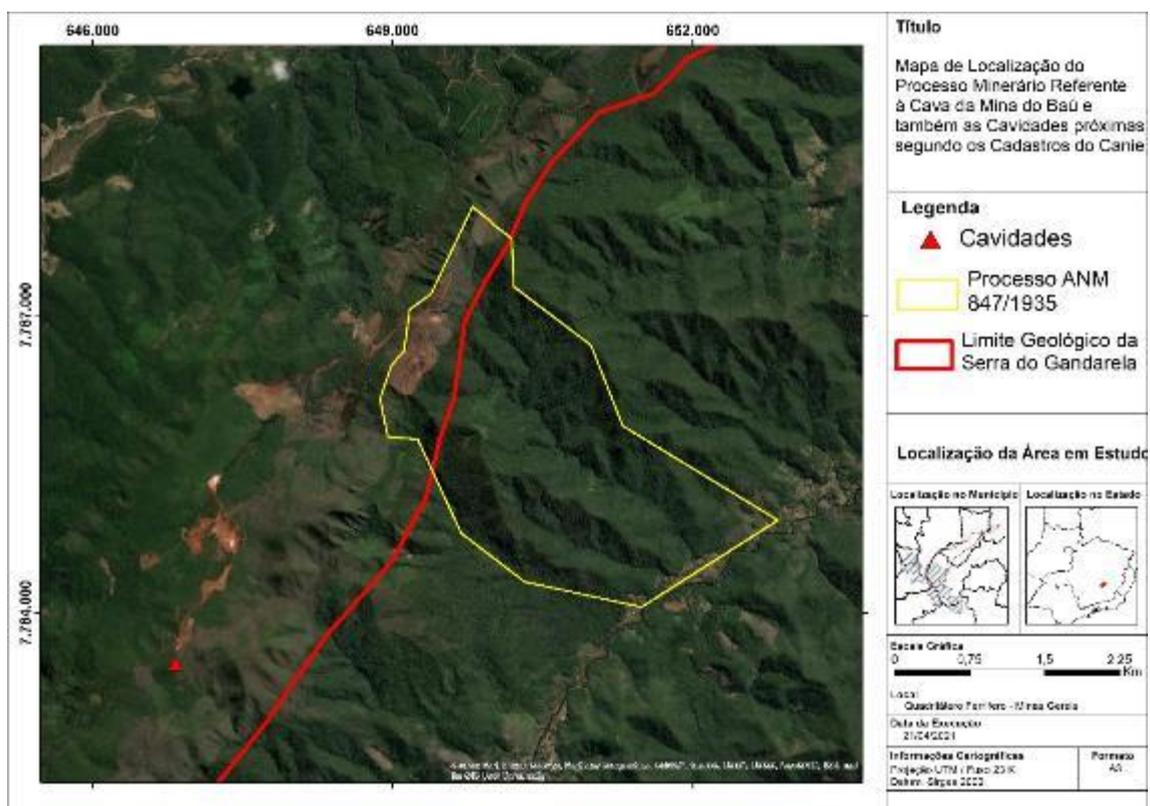


Figura 17 - Mapa ANM da Mina do Baú

### 3.5 Legislação de segurança de barragens

Conforme determinado pela Resolução nº 13, de 8 de agosto de 2019, publicada no diário Oficial da União, no dia 12/08/2019, pela Agência Nacional de Mineração, todas as barragens de mineração, cujo método de construção seja naquele denominado “a montante” devem ser descaracterizadas até a data de 15 de agosto de 2022. A Figura 18 apresenta o método de construção de barragens a montante (Valerius, 2014).

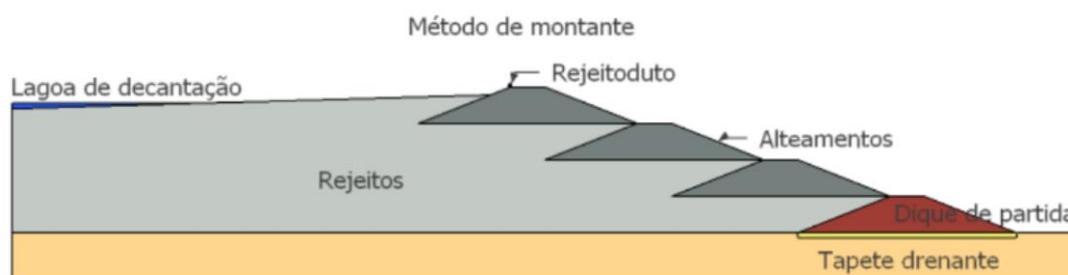


Figura 18: Sistema de barragens a montante (Valerius, 2014).

Como podemos observar em imagens de satélite da Agência Espacial Europeia (ESA), de livre acesso e com possibilidade de dados históricos, por evolução temporal e projetos de engenharia, as barragens são sempre construídas sobre áreas de drenagens, em talwegues encaixados entre encostas. (Casagrande, 2019). Por tais características, no caso da ocorrência de acidentes, possuem consequências desastrosas, uma vez que todo o rejeito acumulado é carregado no fluxo de drenagem principal. (Hack, 1976).

No Quadrilátero Ferrífero, na área em que se localiza a Serra do Gandarela, houve recentemente casos de desastres ligados ao rompimento de barragem. Em geral, nesses casos, o fluxo detrítico do material rompido seguiu o canal de drenagem principal da sub-bacia na qual o barramento se encontrava. (Casagrande, 2019).

Foi solicitada, pela Agência Nacional de Mineração (ANM), a descaracterização das barragens de rejeito construídas por método a montante. Justifica-se isso devido às vastas e duradouras consequências sociais, ambientais, econômicas e políticas (Thomé, 2014), como o assoreamento de rios e a morte de funcionários, terceiros e pessoas dos povoados próximos.

### 3.6 SIG e análise multicritérios

Ao se utilizar dados de Sistemas de Informações Geográficas, deve-se sempre optar pelo melhor método segundo os objetivos de análise espacial, discutindo aplicações, restrições e potencialidades. (Moura, 2012). Ainda segundo a autora, a utilização dos recursos de geoprocessamento para a realização de uma análise espacial requer a adoção de metodologias que sigam um roteiro a partir de discussões sobre os motivos da investigação proposta. Ou seja, são a escolha das variáveis a serem transformadas em planos de informação e a escolha dos modelos de análise espacial que promovem a combinação dessas variáveis que propiciarão a assertividade da análise proposta. Segundo Moura (2004), essa escolha das variáveis mencionada deve ser apoiada por revisões bibliográficas, para abordar um problema e chegar a uma solução final, mediante aproximações sucessivas.

Moura (2003) avalia que os dados levantados podem ser organizados em escalas nominal (qualitativa ou seletiva) ou ordinal (de razão).

Dados de escala nominal seriam aqueles nos quais não existe nenhum julgamento de valor, por exemplo, um Mapa de Uso do Solo, onde não se pode dizer que a cobertura vegetal seja mais ou menos importante que a área urbana, a não ser que se aplique um recorte classificatório, como o valor da terra, para fins de linha de transmissão de energia elétrica. Em resumo, essa classificação não permite a aplicação de operações aritméticas, por serem dados nominais e qualitativos.

Dados de escala ordinal são aqueles os quais é possível ordenar segundo grandeza ou preferência e, assim como na classe anterior, não é possível aplicar operações aritméticas, mas somente avaliar a frequência e a classe modal. Seriam aqueles casos baseados em hierarquia, como estradas municipais, estaduais e federais.

Dados de intervalo já seriam aqueles em que cada observação pode receber um valor numérico preciso. O ponto zero indica a ausência da característica medida. Esses dados são de infinita extensão e densidade entre suas posições. A utilização de operações aritméticas é limitada a transformações lineares, sendo possível aplicar técnicas de estatística paramétrica.

Moura (2012) discute ainda que, uma vez necessária a realização de operações numéricas, é de grande interesse que se realize também a conversão dos dados vetoriais em matriciais. Nesses dados matriciais, geralmente representados por um *raster*, cada forma, diferente de um vetor (onde são dadas coordenadas dos pontos de amarração), será representada por um pixel de uma

determinada resolução (tamanho do pixel). Sendo assim, toda a extensão do espaço estudado receberá um valor, que pode ser de densidade, de existência ou inexistência de uma informação, representada em formato binário ou classificatório.

A autora continua a discussão sobre a natureza do uso do formato *raster* ao dizer que, por trabalhar com uma superfície que utiliza uma geometria digital discretizada, todos os elementos morfológicos (pontos, linhas e polígonos) serão representados por conjuntos de pixels, após passar por um processo de generalização. (Teixeira et al., 1992). A aceitação dessa generalização irá depender dos objetivos necessários na utilização dos dados espaciais, e a resolução empregada deve responder às expectativas de posicionamento e dimensão dos elementos retratados.

Uma vez aceita essa generalização, desde que atendidas as exigências de resolução necessária para a análise, Moura (2012) continua seu raciocínio segundo um pensamento que vem desde a década de 90. Tomlin (1990) faz o seguinte comentário: “O *raster* é rápido, e o vetor apenas parece mais preciso.” Tal afirmação resumiria a ideia de que, apesar de parecer que a generalização de coordenadas cartesianas no sistema vetorial para dados matriciais em *raster* geraria uma perda de resolução prejudicial à análise e talvez menos amigável à visualização em determinada escala, operações geométricas matriciais são muito mais simples de serem resolvidas do que informações topológicas vetoriais. Ou seja, pode-se escolher um tamanho de pixel que atinja uma resolução de forma a não prejudicar a visualização dos dados, porém, para a realização de operações computacionais, apresenta uma complexidade matemática muito menor, gerando resultados muitas vezes mais interessantes.

Ainda segundo a autora (apud Câmara, 2005), as estruturas em *raster* são mais orientadas à posição, enquanto o formato vetorial é mais orientado ao tema, o que seria o ideal para promover diferentes modelos de análise espacial por combinação de matrizes, por poder especializar as variáveis em “superfícies potenciais” de distribuição da ocorrência ou fenômeno de interesse.

A elaboração do mapa do potencial espeleológico local de uma dada área de estudo é feita pela análise multicritérios, levando em conta os fatores relacionados à(s): litologia, estruturas geológicas, hidrografia, declividade, hipsometria e feições geomorfológicas (Instrução Normativa SEMAD 08/2017). A metodologia utilizada para a elaboração do mapa de potencial espeleológico deverá também ser apresentada em detalhes.

### 3.7 Modelagem geológica 3D

A modelagem geológica 3D é uma técnica amplamente aplicada na indústria mineral, com o intuito de aferição de teores e volumes dos corpos minerais. (Buchi, 2018). A metodologia mais comum para a modelagem é a explícita, que ocorre por definição dos contatos e desenho dos corpos de forma manual. (COWAN et al. 2003). É feita, então, a triangulação de objetos para representação do corpo geométrico. Esse método é conhecido como o “método das seções”. Com um alto custo de tempo e conforme discussões propostas por Cowan et al. (2003 e 2004), apresenta imprecisões e dependente de outras informações de subsuperfície, tais como testemunhos de sondagem. A modelagem implícita foi, então, uma ferramenta apresentada pelos mesmos autores como um meio de diminuir a imprecisão e o tempo na modelagem geológica. Ao se tratar um mapa geológico, como é proposto neste trabalho, a metodologia de modelagem implícita apresenta mais benefícios para a de geovisualização de dados geológicos de campo. Ou seja, os modelos geológicos 3D podem ser criados a partir de mapas geológicos, de forma rápida e precisa. (Buchi, 2018).

A modelagem geológica 3D é uma ferramenta cada vez mais utilizada para a compreensão de toda a complexidade tridimensional de suas formas, proporcionando uma visualização mais eficaz, com a associação de imagens realísticas, configurando uma representação em realidade virtual – RV. (Buchi, 2018).

Ainda segundo Buchi (2018), o *software Leapfrog Geo* é o programa pioneiro e mais eficiente para gerar modelos geológicos 3D por modelagem implícita, método que promove agilidade no modelamento ao utilizar interpolações computacionais pré-estabelecidas, como tratado em Cowan et al. (2004).

Em 2003, Cowan diz sobre o conceito da modelagem implícita, sendo diferentemente da modelagem explícita como método que diminui tempo e imprecisões, já que a construção do modelo geológico ocorre a partir do mapa geológico de forma semiautomática. (Cowan et al. 2003).

## **CAPÍTULO 4: METODOLOGIA**

Este capítulo tratará dos métodos e fluxos de trabalho necessários para abordar a vertente da espeleologia análise multicritérios e da modelagem geológica.

### **4.1 Revisão teórica e construção do banco de dados cartográficos**

Inicialmente, é necessário realizar um levantamento bibliográfico sobre o tema, considerando os fatores relevantes para a ocorrência de cavidades, principalmente aqueles citados na Instrução Normativa nº 08/2017 da Secretaria de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável do Estado de Minas Gerais. Para isso, é necessário considerar fatores geológicos, hidrográficos, topográficos e geomorfológicos, de forma que possa se analisar todos os aspectos que influenciam no potencial de ocorrência de cavidades. Dessa forma, foram levantados todos os dados cartográficos necessários a partir da base de dados disponíveis no CECAV, do mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero, elaborado por Endo (2019). A topografia utilizada foi a base de dados oficial do Brasil, SRTM. Os dados de hidrografia foram retirados do mesmo mapa geológico utilizado.

### **4.2 Seleção da área de estudo**

A área de estudo deve ser delimitada a partir de fatores semelhantes, de forma que possa se saber com certeza que a comparação que está sendo realizada se encontra em um mesmo contexto regional. Dessa forma, foi selecionada a área que abrange todo o contexto geológico da Serra do Gandarela, dando destaque para as formações Cauê e Gandarela do Grupo Itabira, assim como para as coberturas de canga, uma vez que são os tipos litológicos mais favoráveis à ocorrência de cavidades. Já foram ilustrados, neste trabalho, diversas figuras com o domínio da Serra do Gandarela, que é a área alvo de estudo.

### **4.3 Análises cartográficas a serem realizadas**

Devemos, então, selecionar as localidades às quais será dada maior atenção para nossas análises cartográficas.

Dessa forma, foram elencadas:

1. Região da Mina de Gongo Soco;
2. Região da Mina de Brucutu;
3. Região da Mina do Baú;
4. Região do Parque Nacional do Gandarela.

As minerações foram elencadas por envolverem obras de engenharia, com potencial impacto irreversível às cavidades naturais subterrâneas. Já o parque foi um alvo devido à grande quantidade de cavidades mapeadas lá, o que nos ajudará a fazer uma comparação do potencial espeleológico previsto para o encontrado de fato, ao cruzar com as cavidades já registradas.

A principal análise que será feita é a observação da relação entre os empreendimentos, o potencial espeleológico teórico calculado e a ocorrência de cavidades registradas.

#### **4.4 Considerações sobre a eficiência do método utilizado**

O método será baseado na observação e no cruzamento de informações espaciais adquiridas.

Será elaborado um mapa de potencial teórico a partir dos dados geográficos disponíveis. A metodologia para a elaboração do mapa será apresentada em detalhes, no capítulo a seguir.

Como será utilizado o banco de dados das cavidades registradas no CECAV, também será necessário questionar a confiabilidade dos dados. Seria a região do parque mais bem prospectada que as demais por se tratar de uma área de conservação? Esse é um dos questionamentos que devem ser feitos para considerar a eficiência do método.

Os sistemas de coordenadas coerentes foram checados para garantir que todas as informações estejam em uma mesma base cartográfica.

#### **4.5 Elaboração do mapa de potencial espeleológico local**

O mapa de potencial espeleológico será elaborado a partir da definição de todas as feições com os pesos e a elaboração dos *rasters*<sup>6</sup> de cada uma das feições separadamente. A cada feição será, então, atribuído um peso de acordo com o método Delphi. Os fatores considerados serão aqueles citados na IS SEMAD n° 08/2017 rev.1.

Serão, então, justificados esses pesos e apresentadas as tabelas atribuídas para cada uma das feições consideradas. Dentro dos fatores geológicos, apresentados na Figura 19, serão consideradas as litologias e as estruturas. Nos fatores hidrográficos, a rede de drenagem será retirada do mapa geológico utilizado. Os fatores topográficos considerados serão aqueles relacionados à derivada da elevação, de forma a se considerar a inclinação do terreno. Os fatores geomorfológicos estão intrínsecos aos demais considerados (litologia, drenagens e relevo).

---

<sup>6</sup> Dados de imagens compostos por linhas horizontais e colunas verticais, formados por pixels que compõem uma imagem. Ao se utilizar o formato *raster*, cada um dos pixels representa uma região geográfica e o valor de cada pixel representa uma característica da região.

## Fatores litológicos

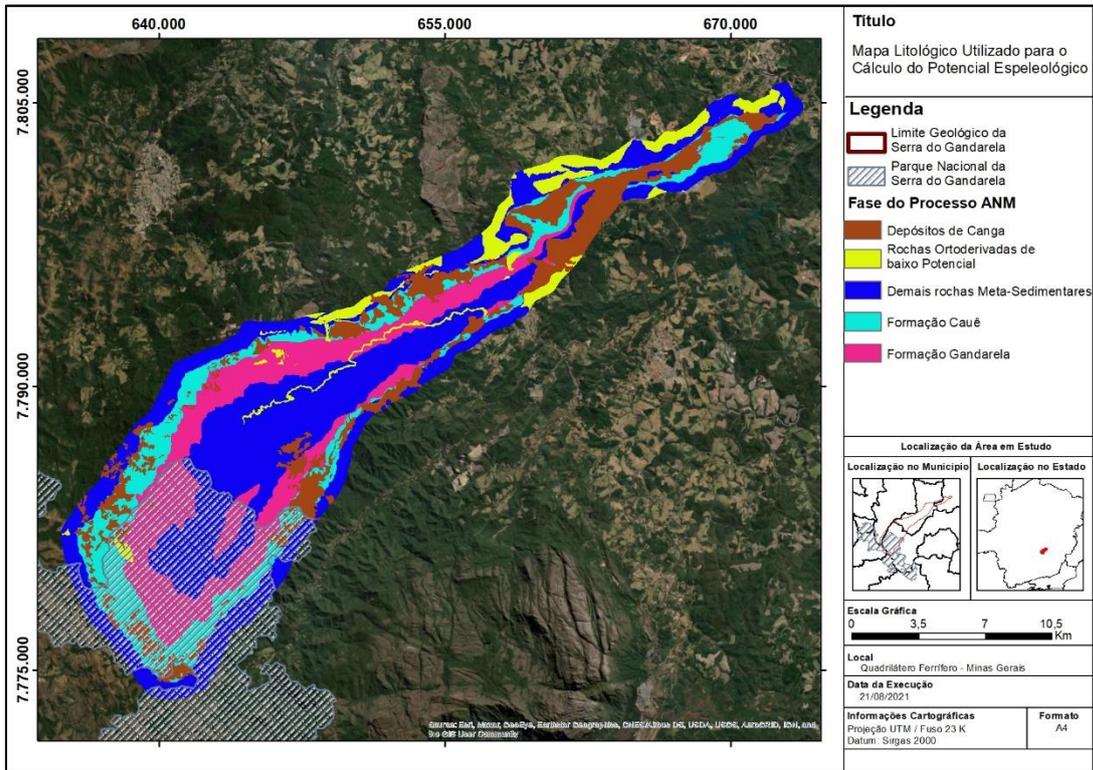


Figura 19: Mapa litológico utilizado para a elaboração do mapa de potencial final.

Considerando os dados mapeados, foi, então, atribuída uma nota para cada litologia. As notas aplicadas foram essas apresentadas na Tabela 4:

Tipo Litológico	Nota
Cobertura de Canga	9
Formação Gandarela	8
Formação Cauê	5
Demais Rochas Sedimentares	3
Rochas Ortoderivadas	1

Tabela 4 – Notas atribuídas para cada litologia

Para essa análise, foi realizada uma generalização dos grupos litológicos de forma a melhor se expressar o potencial de ocorrência de cavidades. Onde foi considerado “demais rochas

sedimentares”, por exemplo, foram unidos tipos litológicos de diferentes agrupamentos litológicos, porém de semelhante potencial.

### **Fatores estruturais**

Os fatores estruturais considerados foram o traço axial do sinclinal Gandarela e as demais estruturas mapeadas (falhas, contatos sobre coberturas e zonas de cisalhamento. As notas atribuídas estão representadas na Tabela 5:

<b>Estrutura</b>	<b>Nota</b>
Traço Axial do Sinclinal Gandarela	5
Falha Indiscriminada	4
Falha de Empurrão	4
Falha Normal	4
Contatos	4

Tabela 5 – Notas atribuídas para cada estrutura

Na Figura 20 encontramos ilustradas as estruturas consideradas. No caso foram avaliados os contatos, as falhas de empurrão, as falhas indiscriminadas e o traço axial da Serra do Gandarela

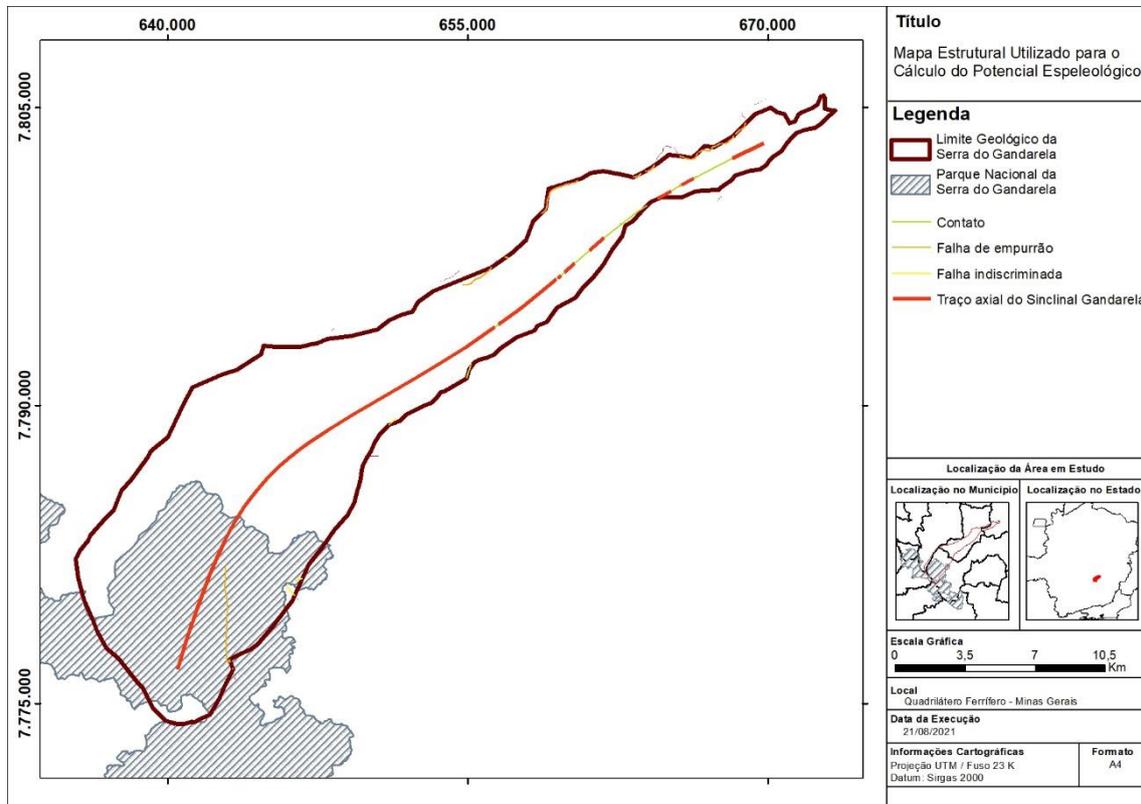


Figura 20: Estruturas consideradas para o mapa de potencial.

### Fatores hidrográficos

Quanto aos fatores hidrográficos, foi considerada apenas a presença ou a ausência de drenagens. Sendo assim, a distribuição de notas foi, conforme a Tabela 6:

Drenagem	Nota
Presença de Drenagens	6
Ausência de Drenagens	1

Tabela 6 – Notas atribuídas para presença / ausência de Drenagens.

A Figura 21 apresenta o mapa considerado, extraído do mapa geológico tomado como base para o trabalho.

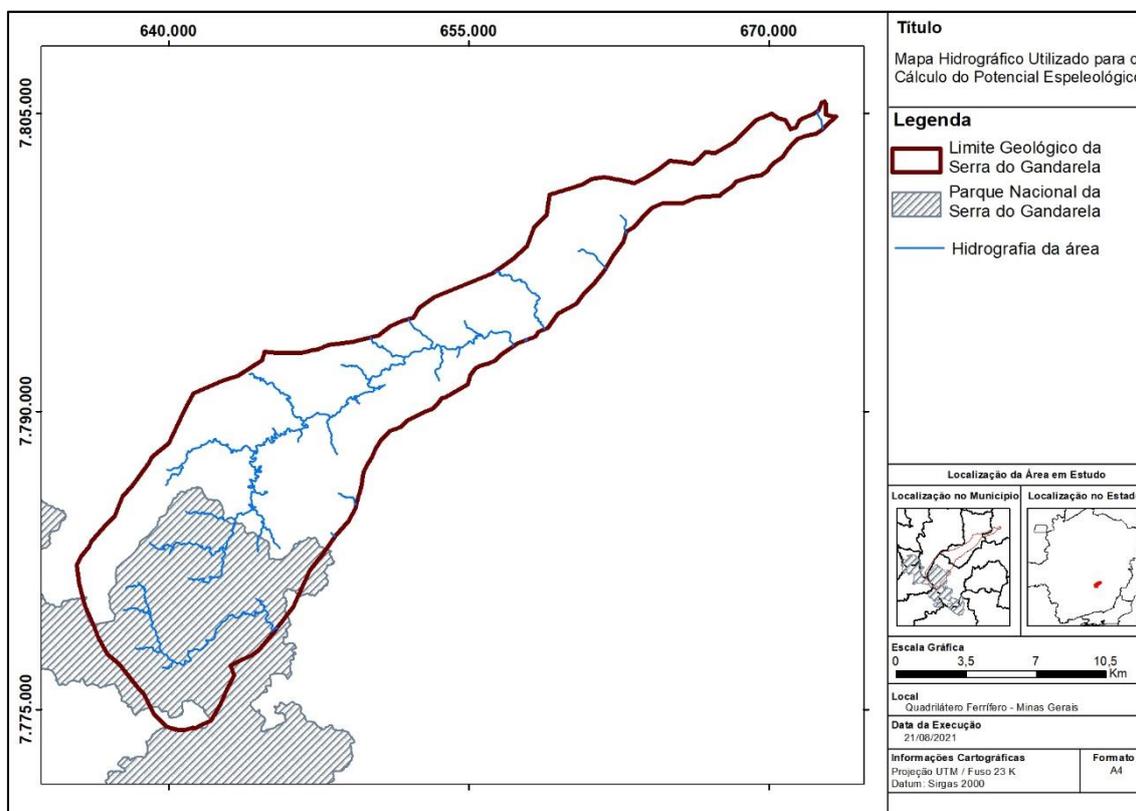


Figura 21: Rede de drenagens utilizada para o cálculo do potencial espeleológico.

### Fatores topográficos

A base geral utilizada para as considerações a respeito dos fatores topográficos foi uma imagem *Alos Palsar*, de resolução do pixel igual a 12,5 metros. De acordo com a interpretação do autor, considerando características de gêneses de cavidades, foi decidido que mais importante que a altitude (hipsometria) é a inclinação do terreno. Dessa forma, ao invés de se considerar o mapa de elevação diretamente, considerou-se o mapa de elevação. Para chegar a esse mapa, foi utilizada a ferramenta “*Slope*”, encontrada no *software*.

Os mapas das Figuras 22 e 23 ilustram o mapa de elevação *Alos Palsar*, utilizado como base inicial, e depois o mapa de declividade, após a aplicação da ferramenta “*Slope*”. Foi utilizada, então, a classificação sugerida pela Embrapa (1999), que dispõe sobre a classificação de relevos segundo a inclinação do terreno em porcentagem, apresentados na Tabela 7, sendo:

<b>Classe de Relevô</b>	<b>Declividade (%)</b>	
Plano	0-3	
Suave Ondulado	3-8	
Ondulado	8-20	
Forte Ondulado	20-45	
Montanhoso	45-75	
Escarpado	>75	

Tabela 7: Classificação de relevo segundo metodologia da Embrapa, de acordo com a declividade em (%).

Modificado de Embrapa (1999).

Então, para se dar uma nota para cada uma dessas 5 classes de relevo, utilizou-se a ferramenta “*reclassify*”. As notas atribuídas estão apresentadas na Tabela 3, que ilustra uma captura de tela retirada do próprio *software* de SIG.

<b>Reclassificação</b>	
<b>Valores Embrapa</b>	<b>Nota Atribuída</b>
Plano	1
Suave Ondulado	2
Ondulado	3
Forte Ondulado	5
Montanhoso	7
Escarpado	9

Tabela 8: Notas atribuídas de acordo com as classes de declividade.

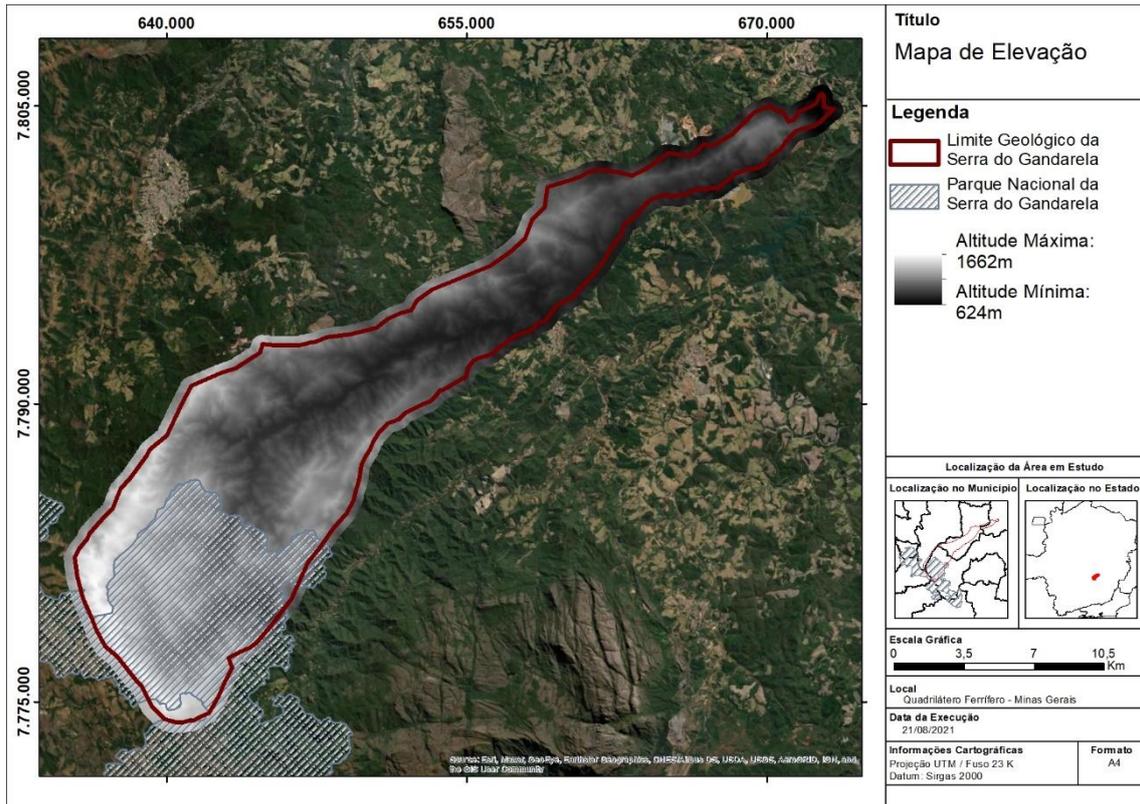


Figura 22: Mapa de elevação segundo a base Alos Palsar.

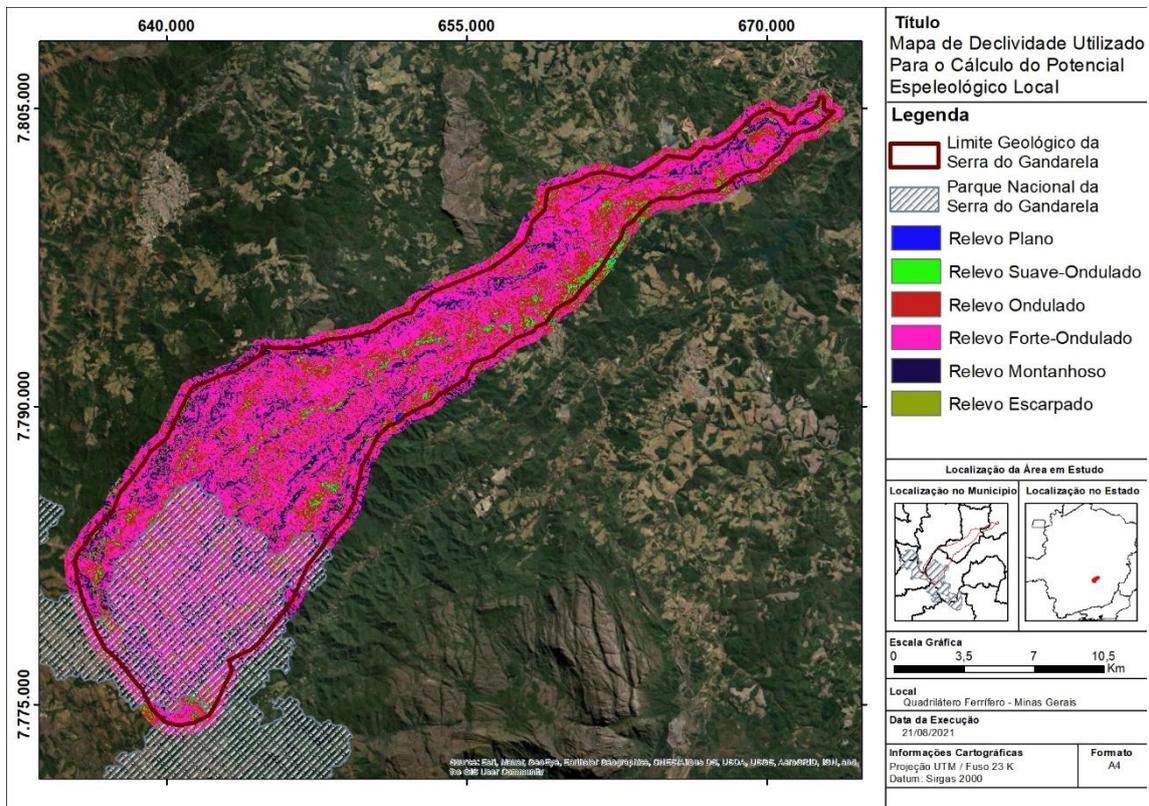


Figura 23: Mapa de declividade após a aplicação da ferramenta *Slope* e reclassificação segundo os parâmetros da Embrapa (1999).

**Mapa de potencial local**

Foi então elaborado o mapa de potencial final a partir da soma de todos os fatores. Para tal, foi feito o cálculo da média de todos os parâmetros de entrada utilizados. Para isso, somaram-se todos os pixels mapeados com as devidas notas atribuídas, resultado que será demonstrado no Capítulo 5 indica que as regiões mapeadas com pixels de notas altas geraram um potencial espeleológico mais alto. Aquelas regiões onde as somas dos pixels resultaram em uma média final menor gerarão um potencial espeleológico mais baixo. Para cada nota atribuída será apresentado um peso referente à mesma, de forma que foi-se ajustando diferentes pesos para cada uma das notas dadas de forma a buscar atingir o melhor resultado.

## 4.5 Modelagem geológica 3D

### Modelagem implícita em *Leapfrog*

O *software LeapFrogGeo* é uma ferramenta de modelamento geológico 3D implícito. O algoritmo de interpolação do *software* considera dados de sondagem, pontos, linhas e superfícies no campo 3D, relacionando-os de acordo com os tipos de camadas geológicas a serem modeladas, o seu *trend* estrutural, o elipsoide e o seu variograma. Para esse modelo, foram utilizadas ferramentas do *software* para criar superfícies, como depósitos sedimentares deformados, superfícies erosivas, lentes modeladas como intrusões. As litologias que apresentam camadas contínuas no modelo foram geradas a partir do interpolador “*deposit*” ou “*erosion*”, dependendo da relação de corte entre os litotipos, utilizando as *polylines* dos contatos nas seções desenhadas a partir dos furos e as *polylines* dos contatos em mapa.

### Dados de entrada

Como dados de entrada para a elaboração do modelo geológico da região, foram utilizados:

- Topografia SRTM: A topografia baixada em portais públicos é apresentada na Figura 24. A interpolação das curvas de nível foi feita de acordo com a resolução do dado bruto, de 50 metros. A Figura 24 apresenta a área de estudo sobre a topografia gerada. Foi escolhida a topografia em SRTM para o modelo em vez da *Alos Palsar*, pois a resolução de 50 metros é suficiente para a interpretação do caso e também mais leve.

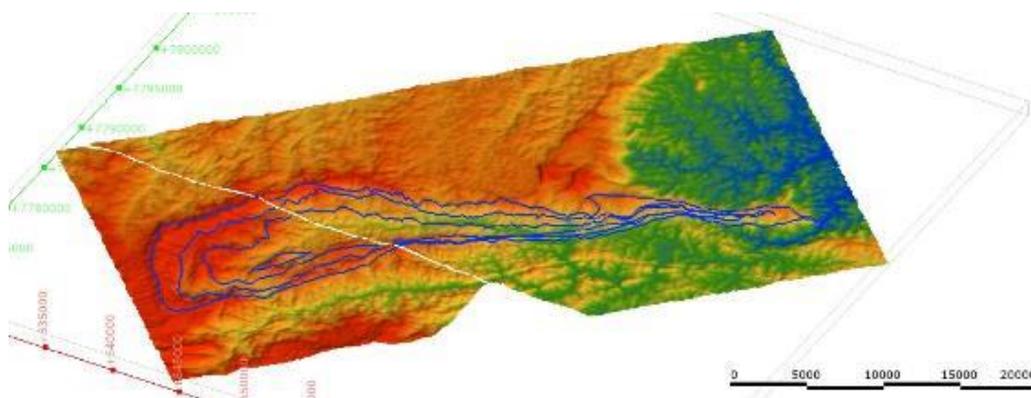


Figura 24: Topografia SRTM extraída aberta no *software*.

- Mapa geológico: A base geológica utilizada, quanto a limites de litologias, agrupamentos e considerações estruturais, foi o mapa geológico elaborado por Endo em 2019, já apresentado neste trabalho.

- Condições de contorno: Para a elaboração do modelo geológico, é necessário escolher um limite para o contorno de sua área. A área escolhida, apresentada na figura 25, foi um *buffer* de 500 metros do contato do Grupo Itabira com as demais rochas siliciclásticas intrusivas ou graníticas presentes no Quadrilátero Ferrífero, fora do contexto direto da Serra do Gandarela propriamente dita.
- Litologias de interesse: O mapa geológico utilizado como base para o presente estudo pode ser simplificado, de forma a representar apenas as litologias do Grupo Itabira aqui abordadas.

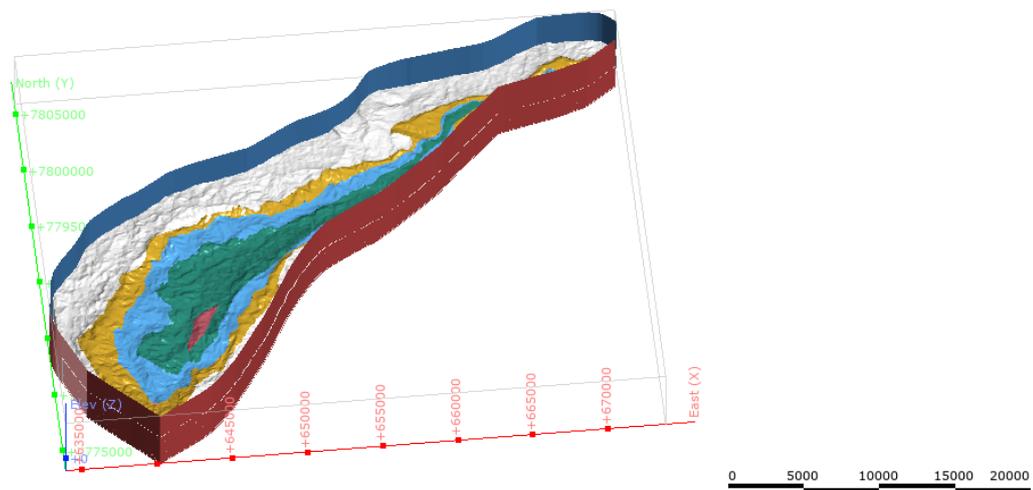


Figura 25: Litologias de interesse e extensão da área de modelagem.

- Criação de linhas nos contatos: A partir do mapa geológico de interesse com as litologias elencadas, é possível traçar linhas de contatos geológicos para a modelagem efetiva no *software*, apresentados na figura 26. Para tal, considerou-se as rochas dolomíticas da formação Gandarela, as rochas ferruginosas da formação Cauê e as demais rochas em contato, predominantemente xistos diversos.

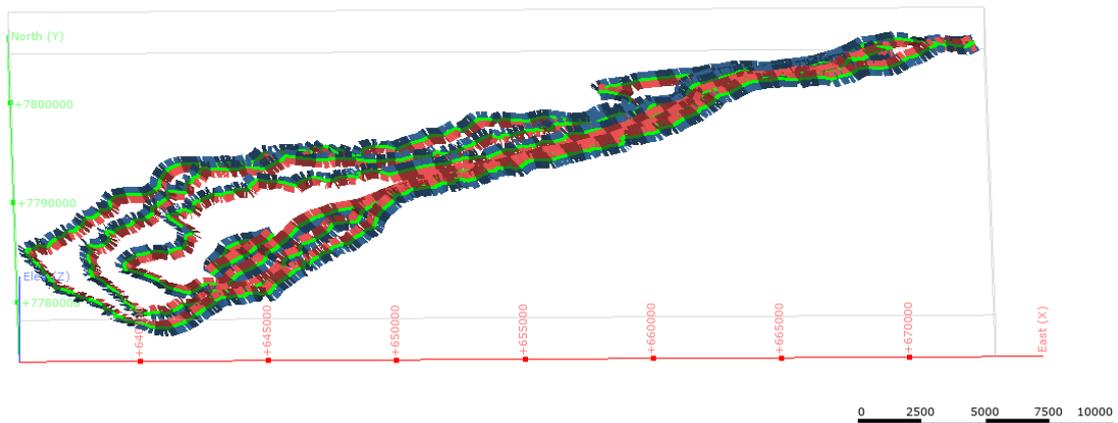


Figura 26: Linhas de contato traçadas sobre o mapa, de forma a retratar as litologias de interesse.

- Interpoladores: Com os contatos demarcados, é possível, a partir de um plano, interpolar as camadas de acordo com o caimento médio marcado no mapa. Também é possível realizar pequenos ajustes finos para dar um *trend* desejado a cada local do contato, a partir da inserção de pontos que vão direcionar uma determinada parte da camada para uma atitude desejada que seja fora do *trend* global. A Figura 27 mostra a direção preferencial representada por um plano.

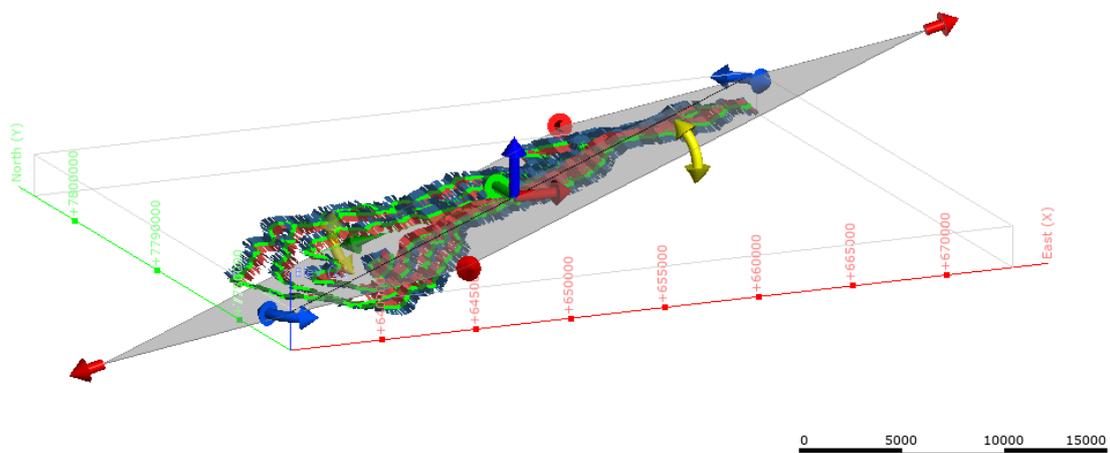


Figura 27: Interpolação das linhas em planos, seguindo um *trend* preferencial.

- Criação dos sólidos: A última etapa do modelo é a criação dos sólidos a partir dos planos modelados. Para isso, o *software Leapfrog Geo* disponibiliza opções para as relações de topo e base da camada e interpola o resultado final de forma implícita, de acordo com os parâmetros imputados.

#### 4.6 Apresentação do mapa de potencial em plataforma 3D

O passo final da metodologia aqui proposta é apresentar a possibilidade de uma visualização dinâmica de todos os dados espaciais e mapa de potencial elaborado em uma plataforma 3D. Será possível apresentar juntamente as cavernas cadastradas com as estruturas de mineração, estruturas de mineração, altimetria e relevo para correlação visual e observações quanto ao potencial de ocorrência de cavidades oclusas. A apresentação no *software* foi possível graças à ferramenta de georreferenciamento disponível, apresentada na figura 28. Na seção de resultados, será apresentado o modelo com o mapa em diferentes visadas.

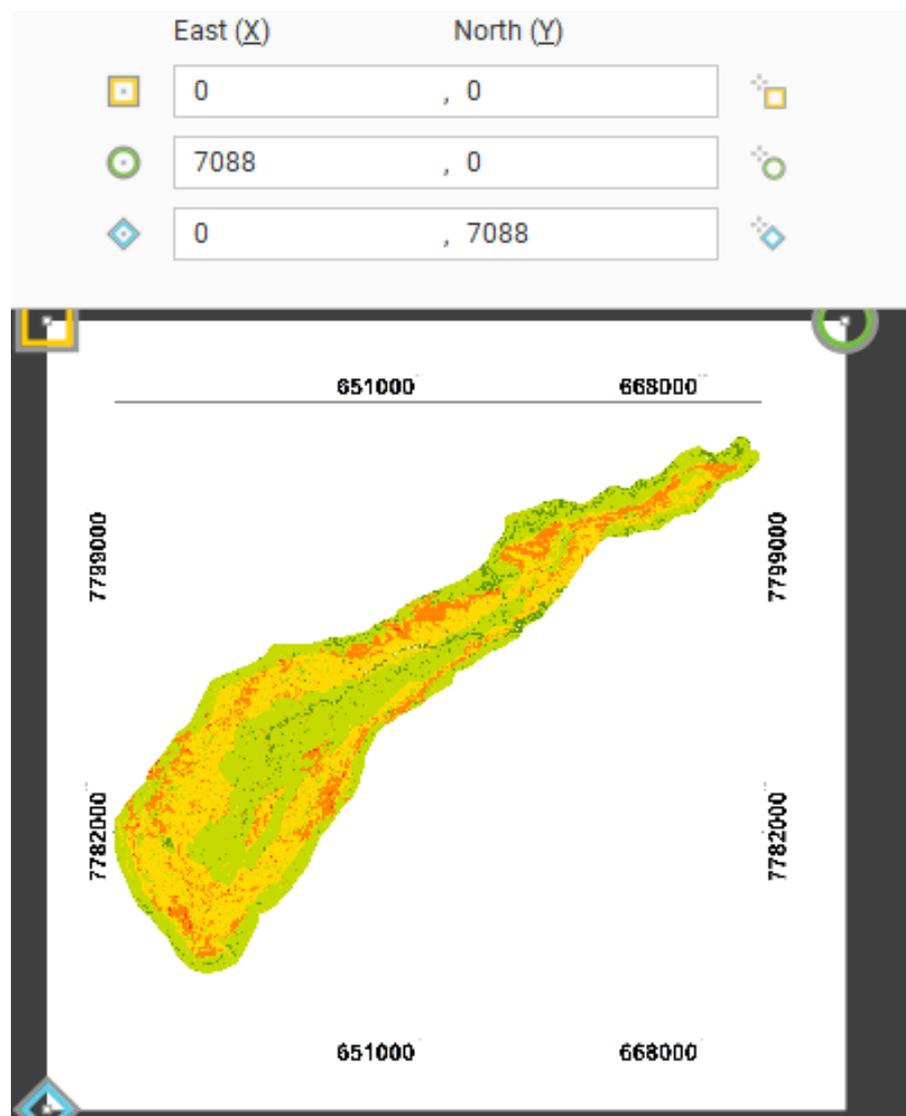


Figura 28: Ilustração da ferramenta de georreferenciamento utilizada para visualização do mapa de potencial no modelo 3D.

## CAPÍTULO 5: RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, serão apresentados os resultados das análises geográficas realizadas e do modelo geológico elaborado. O capítulo está dividido em tópicos, primeiramente, apresentando separadamente o mapa de potencial espeleológico e o modelo geológico e depois a integração de ambos. Serão feitas seções geológicas no modelo, onde poderá ser possível observar o mapa de potencial sobreposto ao modelo.

Com as imagens, será possível realizar uma discussão acerca do resultado, mostrando comparativamente a mudança de potencial de acordo com a mudança de uma determinada feição geológica ou topográfica.

### 5.1 Mapa de potencial elaborado

O mapa de potencial gerado, como descrito no capítulo de metodologia, é apresentado na Figura 29. A figura será apresentada em página única, para uma melhor visualização do mapa. A área total considerada foi de 30.856 hectares com uma média de 64,42 hectares por cavidade.

Observa-se que as maiores ocorrências de cavidades se relacionam às áreas de potencial muito alto e alto. A Tabela 9, abaixo, apresenta uma relação entre a quantidade total de cavernas distribuídas de acordo com o potencial.

	<b>Número de cavidades</b>	<b>Total de Cavidades(%)</b>
<b>Improvável</b>	0	0,0
<b>Muito Baixo</b>	10	2,1
<b>Baixo</b>	59	12,3
<b>Médio</b>	81	16,9
<b>Alto</b>	100	20,9
<b>Muito Alto</b>	229	47,8
<b>Total</b>	479	100,0

Tabela 9 - Total de Cavidades Por Potencial na Área de Estudo

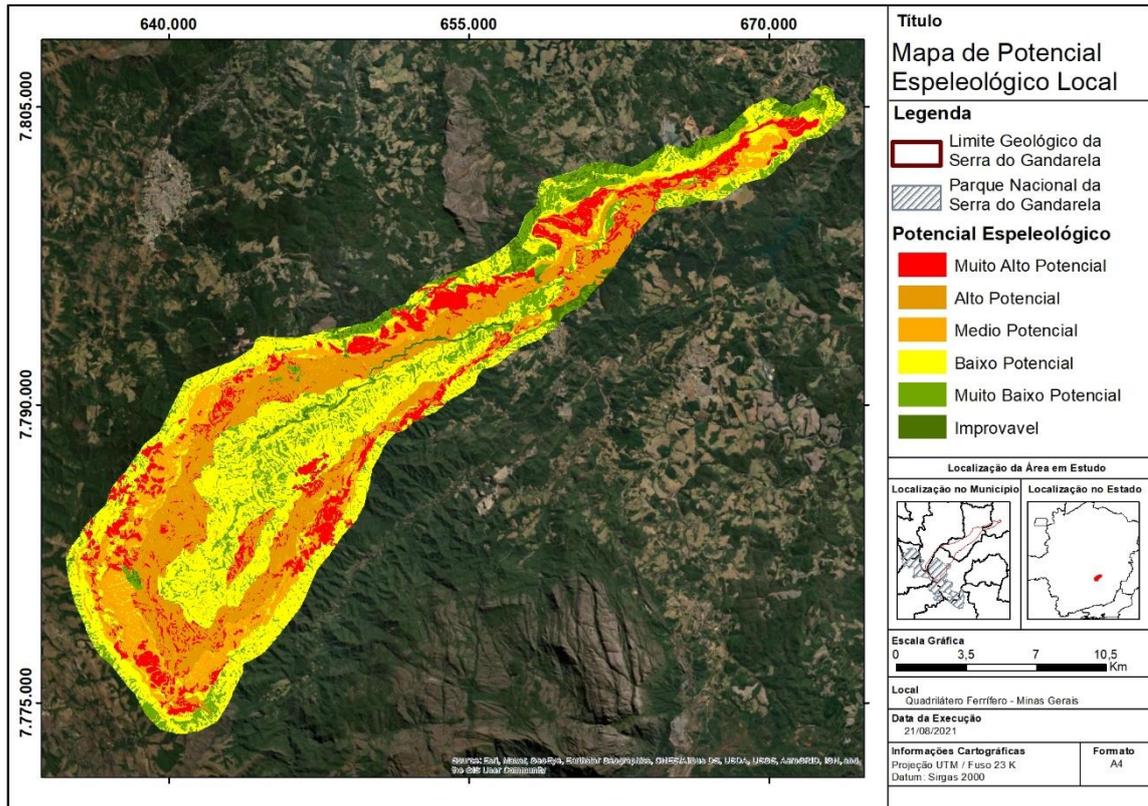


Figura 29: Mapa de potencial espeleológico local.

## 5.2 Observação das áreas de interesse no mapa de potencial elaborado

A partir do mapa de potencial elaborado, foram feitas interpretações e análises de cada uma das áreas de interesse. O mapa da Figura 30 ilustra as quatro áreas elencadas sobre o mapa de potencial.

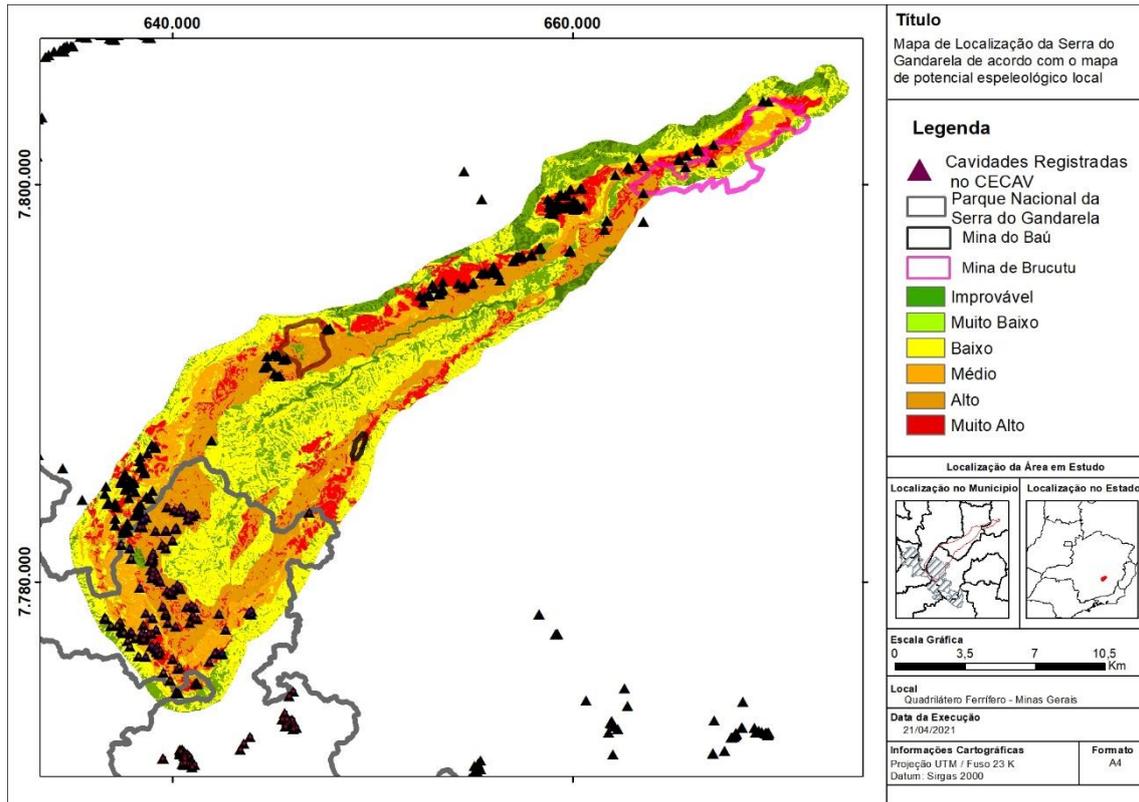


Figura 30: Mapa ilustrando as quatro áreas de interesse sobre o mapa de potencial.

As figuras a seguir darão destaque para cada uma dessas áreas e será também feita uma interpretação de cada caso apresentado.

## Potencial na área do Parque Nacional do Gandarela

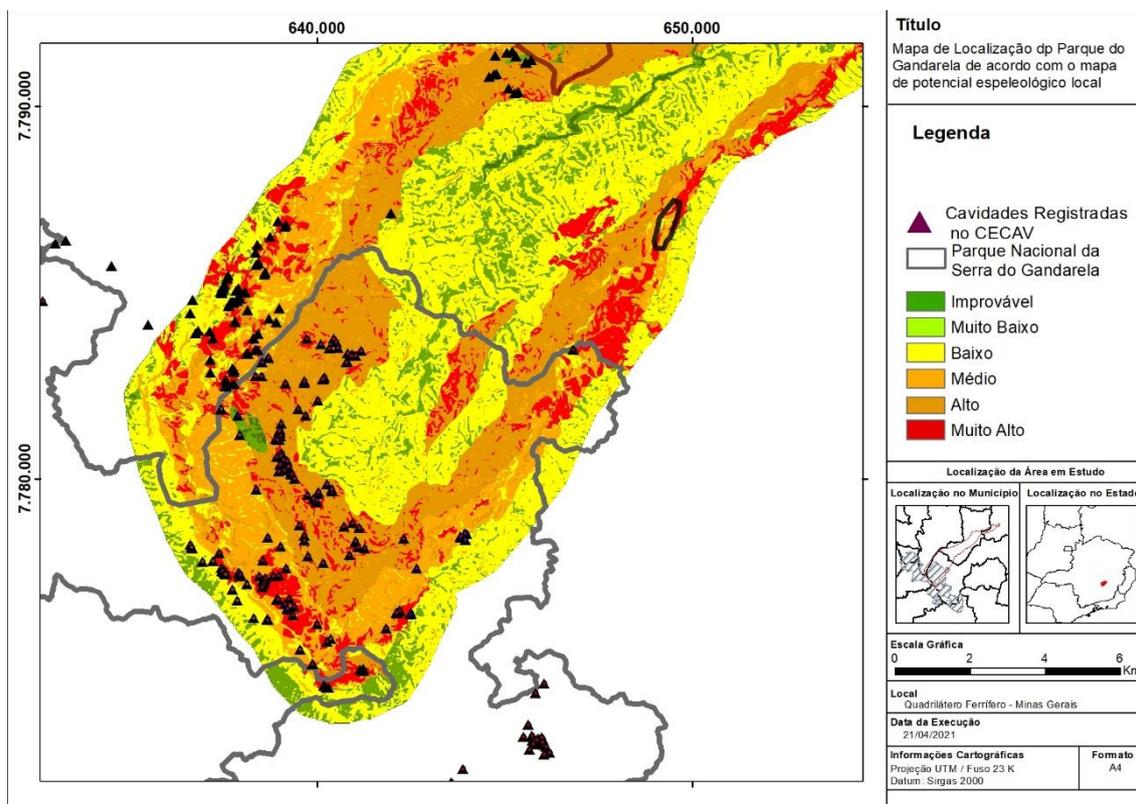


Figura 31: Mapa ilustrando o potencial espeleológico na Serra do Gandarela.

Observa-se que a maior parte das cavidades registradas na região do parque está relacionada às zonas de potencial alto a muito alto. A Figura 31 apresenta a distribuição das cavernas em mapa e a Tabela 10 ilustra a distribuição das cavidades por potencial espeleológico na área do Parque Nacional do Gandarela.

	Número de cavidades	Total de Cavidades (%)
<b>Improvável</b>	0	0,0
<b>Muito Baixo</b>	2	1,2
<b>Baixo</b>	19	10,8
<b>Médio</b>	23	12,8
<b>Alto</b>	62	36,7
<b>Muito Alto</b>	65	38,5
<b>Total</b>	171	100,0

Tabela 10 - Distribuição das Cavidades por Potencial na área do Parque

A figura 32 apresenta a distribuição das cavernas em áreas de Alto e Muito Alto potencial.

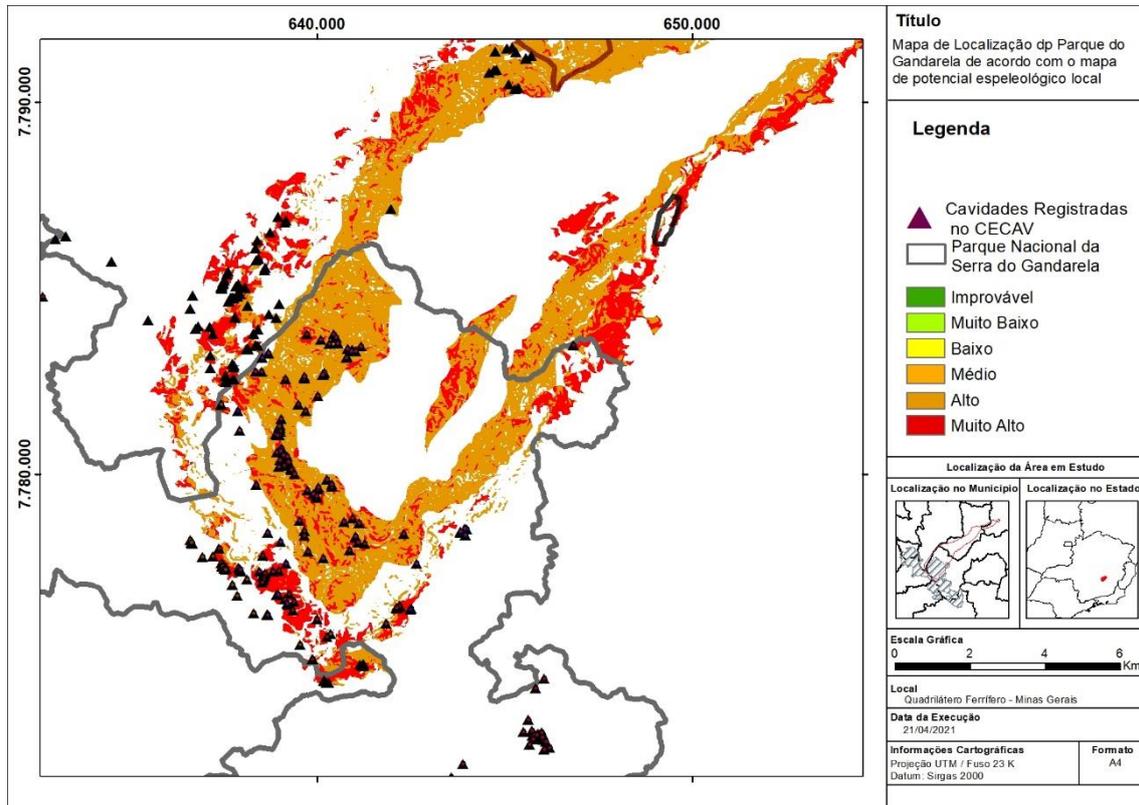


Figura 32: Relação das cavernas em áreas de médio, alto e muito alto potencial.

No caso do Parque, foram contabilizadas 171 cavernas em 8.251 hectares, ou seja, uma caverna a cada 48,25 hectares, um resultado que mostra mais cavernas por hectare (ou menos hectares por caverna) do que a média global da serra do Gandarela. Tais resultados nos levam a indicar uma melhor prospecção realizada na área do parque.

## Mina de Gongo Soco

A figura 33 ilustra a distribuição do potencial espeleológico na área com as cavidades próximas.

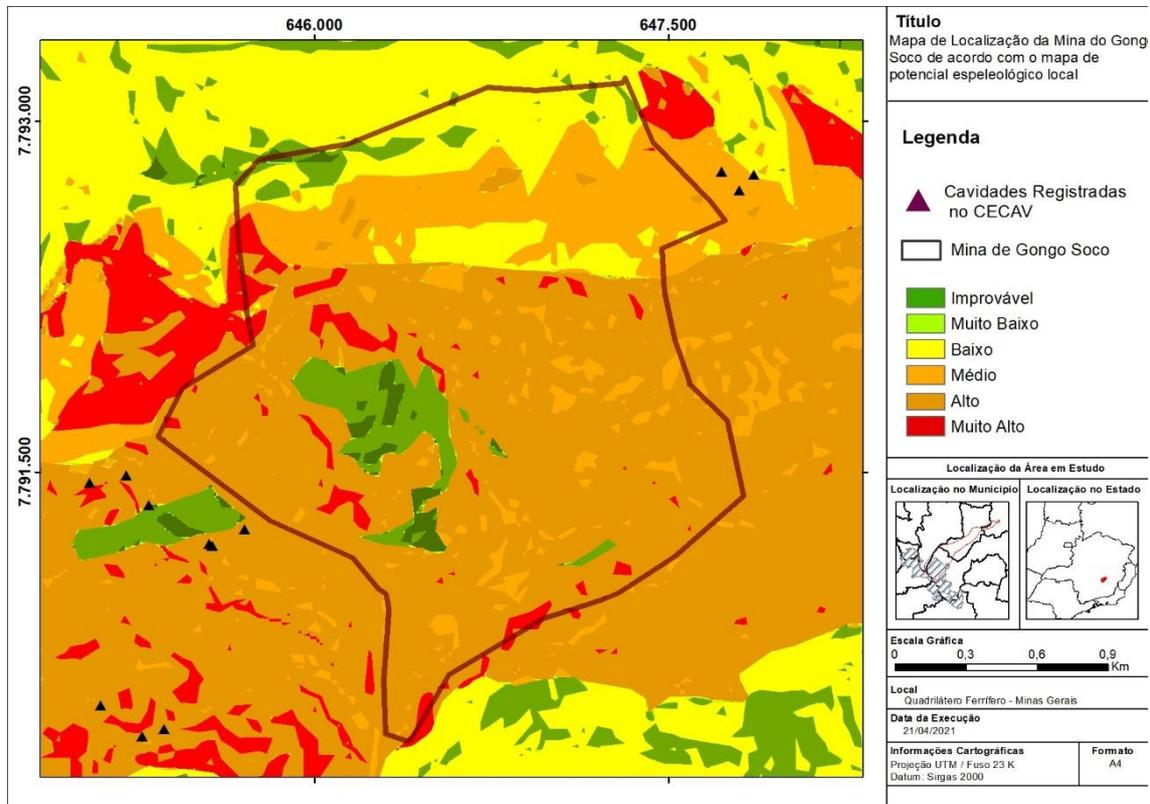


Figura 33: Mapa ilustrando o potencial espeleológico na região de Gongo Soco.

Diferente do caso do Parque, na área contemplada pelos limites das estruturas de mineração de Gongo Soco, não foi identificada nenhuma cavidade. Observa-se, porém, 15 cavidades próximas, assim como no caso anterior, concentradas em zonas de potencial espeleológico alto a muito alto.

Numa área considerada de 422 hectares, não foi identificada nenhuma cavidade nos registros, mesmo estando mais de 59,6% da área total em região de alto ou muito alto potencial, totalizando 235,1(55,9%) hectares em alto e 15,8(3,7%) em muito alto.

## Mina de Brucutu

A figura 34 ilustra a distribuição das cavidades e do potencial na área da mina de Brucutu.

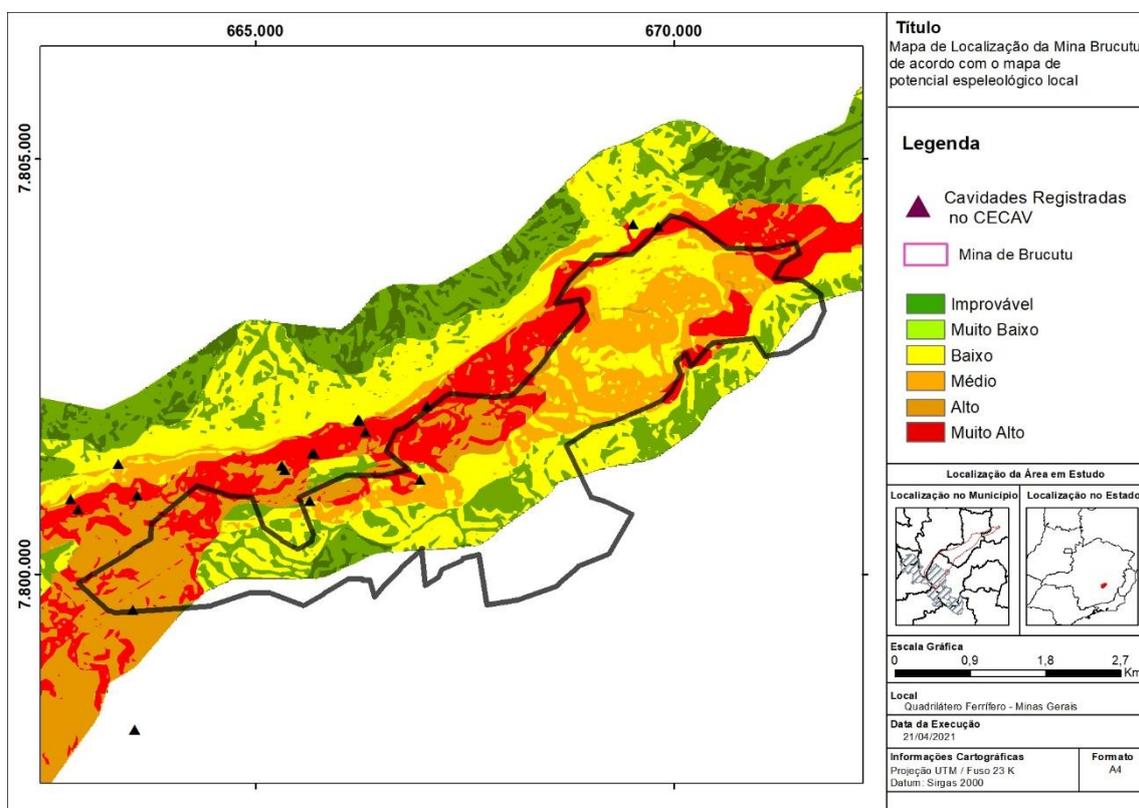


Figura 34: Mapa ilustrando o potencial espeleológico na região de Brucutu.

Na área analisada da Mina de Brucutu, foram identificadas 3 cavidades, todas em zonas de alto potencial, que representam um total de 177,94 hectares, ou 13% da área total, porém com 100% das cavidades ocorrentes. A Tabela 11 apresenta a distribuição de cavidades por potencial.

	Número de cavidades	Total de Cavidades (%)
<b>Improvável</b>	0	0,0
<b>Muito Baixo</b>	0	0,0
<b>Baixo</b>	0	0,0
<b>Médio</b>	0	0,0
<b>Alto</b>	3	100,0
<b>Muito Alto</b>	0	0,0
<b>Total</b>	3	100,0

Tabela 11 – Distribuição de cavidades por potencial na Mina de Brucutu

As treze cavidades próximas encontram-se em áreas de potencial médio para cima. Grande parte dessas áreas relaciona-se às cavidades formadas em coberturas de cangas lateríticas, as quais tiveram um alto potencial atribuído, uma vez que são muito suscetíveis à formação de cavidades, como discutido anteriormente.

A área considerada de 1.307 hectares apresentou 3 cavidades identificadas nos cadastros oficiais, todas relativas a áreas de alto potencial.

## Mina do Baú

A figura 35 ilustra a área da mina do Baú com o mapa de potencial.

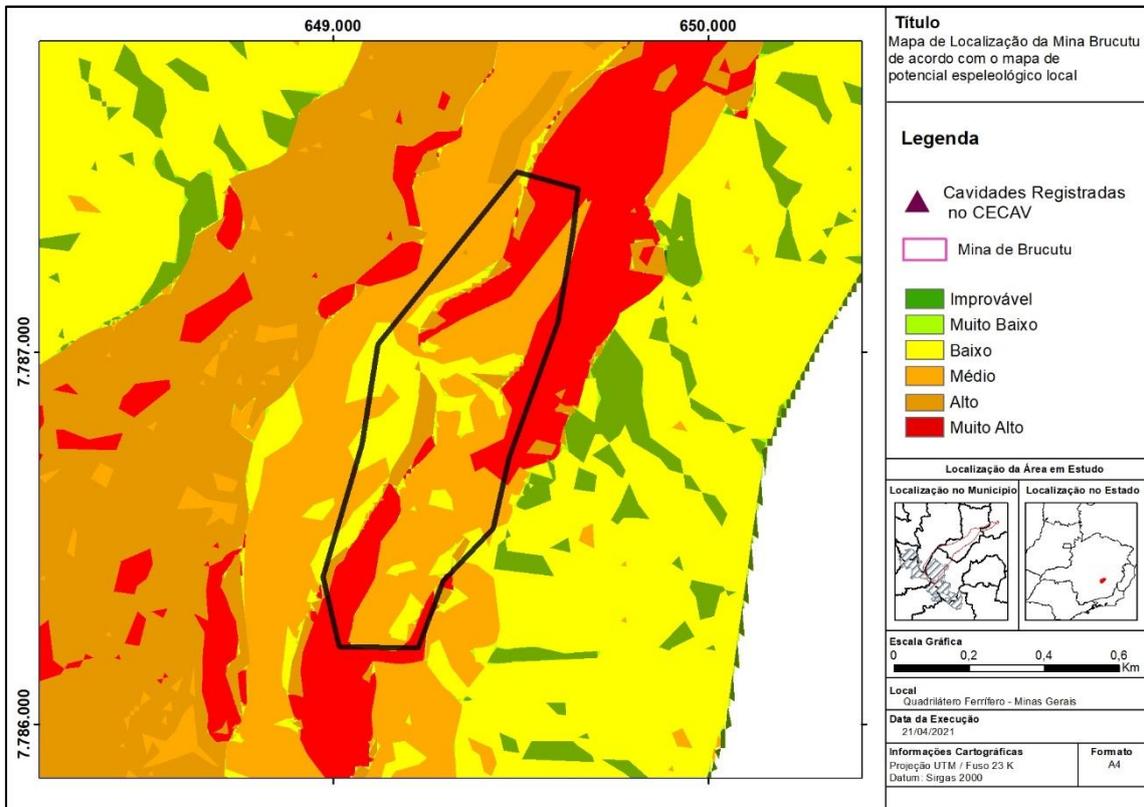


Figura 35: Mapa ilustrando o potencial espeleológico na região do Baú.

Na área analisada da Mina do Baú, não foram identificadas cavernas. A área possui, entretanto, ocorrências de potencial alto e muito alto, os quais foram correlatos em outras ocasiões, com várias ocorrências de cavernas.

A não ocorrência de cavernas próximas, diferente de todas as outras regiões estudadas, levanta uma questão a respeito da localização geológica de cada uma das áreas. Diferente de Gongo Soco e Brucutu, que se situam no flanco norte da serra, a Mina do Baú está situada no flanco sul do sinclinal. Um fator geológico estrutural, não considerado a respeito das diferenças geológicas entre os flancos norte e sul, pode ter influenciado nessa ausência de cavernas próximas na área e próximas. Outra hipótese a ser considerada é um menor esforço em serviços de prospecção espeleológica realizados no local.

Destaca-se também a pequena extensão da área. No total, foi considerada uma área de apenas 53 hectares, com zero cavernas e zero cavernas próximas constadas nos cadastros oficiais.

### 5.3 Modelo geológico 3D elaborado

Aqui é apresentado o mapa de potencial elaborado. A Figura 36 apresenta o modelo geológico elaborado a partir da simplificação da geologia do Quadrilátero Ferrífero proposta por Endo (2019)

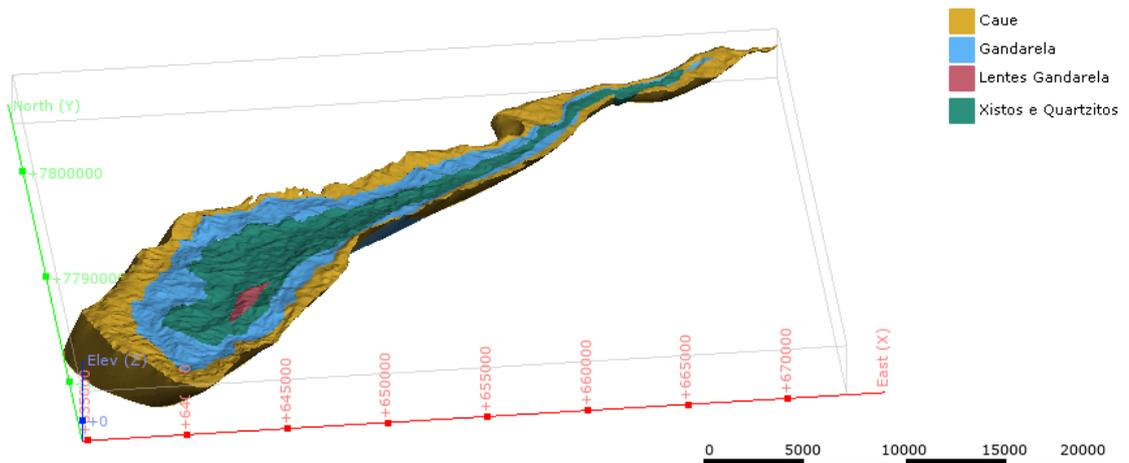


Figura 36: Modelo Geológico Elaborado

A figura 37 apresenta os contatos das litologias apresentadas no modelo acima juntamente com o mapa de potencial considerado. As cores vermelhas, mais quentes indicam mais alto potencial, enquanto as azuis, mais frias, potenciais espeleológicos mais baixos.

A partir da observação dos contatos é possível observar que o potencial aumenta consideravelmente nas porções onde afloram formações rochosas do Grupo Itabira.

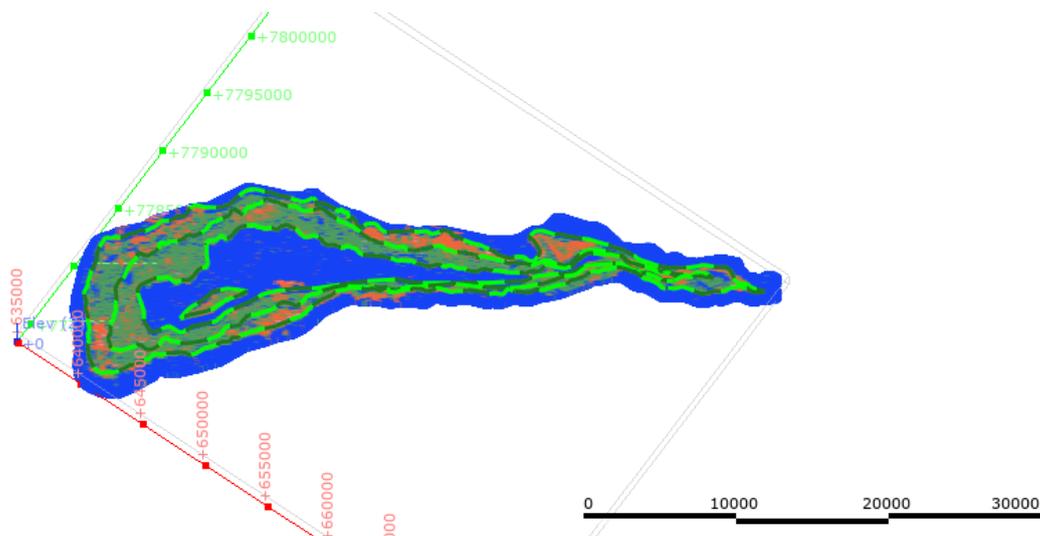


Figura 37: Mapa de potencial considerando os contatos do grupo Itabira

### 5.3 Apresentação integrada dos modelos

A análise integrada dos modelos foi útil para confirmar as análises realizadas. Durante o cálculo do potencial atribuiu-se notas mais elevadas para locais de declividade mais elevada e para locais onde as rochas presentes eram favoráveis ao desenvolvimento de cavidades. A figura 38 apresenta um perfil representativo onde é possível observar essas variações, principalmente no que se relaciona ao fator litológico.

Por outro lado, observou-se que devido à grande quantidade de informações nem sempre foi possível fazer uma análise integrada a partir de apenas uma imagem, uma vez que as feições se sobrepunham de forma a deixar de forma não tão clara os limites de cada ocorrência.

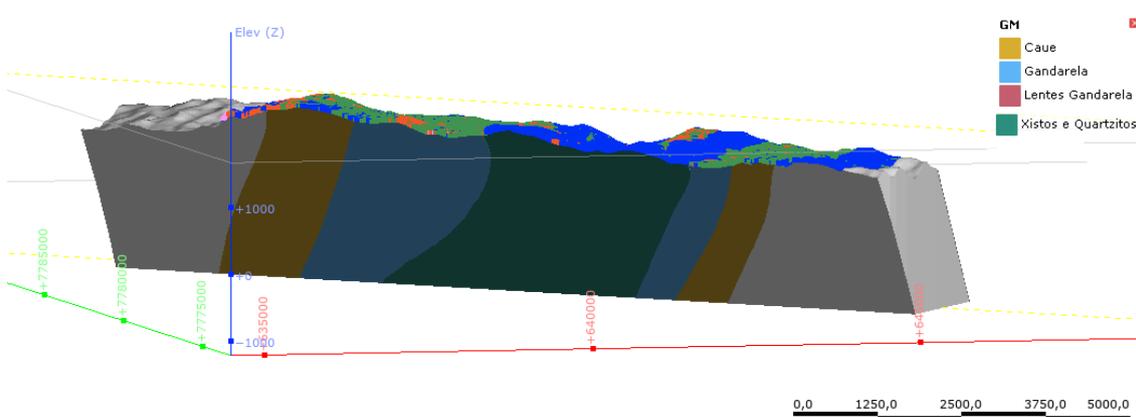


Figura 38 – Perfil representativo do potencial no modelo.

### 5.3 Análises estatísticas quantitativas

Observou-se segundo os estudos de geoprocessamento que em toda a área totalizou um valor de 30.856 hectares. Dessas as áreas estavam distribuídas da seguinte forma, segundo a Tabela 12:

Potencial	Área Total	Área (%)
Muito Alto	3923,7	12,7
Alto	7282,1	23,6
Médio	3882,5	12,6
Baixo	10452,3	33,9
Muito Baixo	4430,7	14,4
Improvel	885,0	2,9
Soma	30856,3	100

Tabela 12 – Total de área por potencial

Podemos observar que o total da soma dos valores “Muito Alto”, “Alto” e “médio” correspondem a 48,9% do total da área mapeada, enquanto os valores de “Muito Baixo”,

“Baixo” e “Improvável” 51,1%, o que indica uma boa distribuição dos valores de potencial por área.

Quanto a questão das quantidades de cavernas tivemos a distribuição apresentada na Tabela 3 e rerepresentada agora na Tabela 13. Se fizermos as contas observamos que 85,6% das cavidades estão em potencial médio para cima, sendo quase 50% no potencial muito alto. As cavidades de potenciais entre Improvável e Baixo representaram apenas 14,4% do total de cavidades. A média de cavidades por hectare global é de uma cavidade a cada 64,42 hectares.

	<b>Número de cavidades</b>	<b>Total de Cavidades (%)</b>
<b>Improvável</b>	0	0,0
<b>Muito Baixo</b>	10	2,1
<b>Baixo</b>	59	12,3
<b>Médio</b>	81	16,9
<b>Alto</b>	100	20,9
<b>Muito Alto</b>	229	47,8
<b>Total</b>	479	100,0

Tabela 13 – Número de cavidades por potencial

Se pegarmos o número total de hectares e dividirmos pela quantidade de cavidades veremos a quantidade de hectares esperada para a ocorrência de uma cavidade, conforme apresentado na tabela 14.

	<b>Hectares / Cavidade</b>
<b>Improvável</b>	-
<b>Muito Baixo</b>	443,1
<b>Baixo</b>	177,2
<b>Médio</b>	47,9
<b>Alto</b>	72,8
<b>Muito Alto</b>	17,1

Tabela 14 – Relação hectares por cavidades

## **CAPÍTULO 6: CONCLUSÕES**

O presente estudo teve como objetivo realizar uma revisão bibliográfica a respeito de aspectos geológicos da Serra do Gandarela, da legislação de cavidades, do histórico de direitos minerários na região de estudo, de métodos e ferramentas aplicadas em Sistemas de

Informações Geográficas (principalmente análise de multicritérios) e de Modelagem Geológica 3D, destacando-se para o último o método de modelagem implícita.

Utilizou-se então como base um banco de dados composto pelo mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero elaborado por Endo em 2019, base de dados de cavidades disposta no CANIE, topografias *Alos Palsar* e SRTM além de sistemas de drenagens e estruturas também extraídas do mapa geológico. Considerando esses fatores foram atribuídas notas a cada um deles de forma a se gerar um mapa de potencial espeleológico, conforme as diretrizes dispostas na IS 08/2017. O mapa de potencial gerado foi observado em detalhe em quatro áreas de maior interesse que se revelaram durante os processos de geoprocessamento, sendo elas: a Mina de Gongo Soco, a Mina de Brucutu, a Mina do Baú e o Parque Nacional do Gandarela.

Durante a análise detalhada do potencial foi possível perceber que, apesar da maior área a região do Parque Nacional abriga uma quantidade muito maior de cavernas do que as demais regiões analisadas. Observou-se também que a região da Mina de Gongo Soco, apesar de seus mais de 255 hectares em zonas de Alto ou Muito Alto potencial, nenhuma caverna foi registrada, diferente do que era esperado para a previsão de cavernas por hectare em potencial alto, de 72 hectares por caverna ou de potencial muito alto, de 17,1 hectares por caverna. Segundo as análises deveriam ser esperadas em uma média global um total de 64 hectares por cavidade, e a mina de Gongo Soco não alcança isso nem mesmo com sua área de 422 hectares, o que seria esperado era uma ocorrência de ao menos 6 cavidades ou mais, considerando sua grande área em regiões de alto potencial. Tais resultados nos fazem desconfiar a presença de cavidades não mapeadas possivelmente ocorrentes sob estruturas de mineração na mina de Gongo Soco.

A mina do Baú também não registou nenhuma cavidade, mas nesse caso pode se entender devido a sua pequena área de apenas 53 hectares, localizados na porção Sul da Serra.

Paralelamente a esse estudo foi realizado um modelo geológico 3D da área de forma a representar a geologia da área possibilitando a realização de cortes transversais que demonstrem a variação das litologias e topografias. O mapa de potencial então foi sobreposto ao modelo de objetivando mostrar as variações de potencial com os fatores inseridos no modelo de forma dinâmica.

O resultado pretendido com esse trabalho foi apresentar uma forma de cálculo de potencial espeleológico e também levantar questões como a menor densidade de cavidades em regiões próximas a áreas de mineração, quando comparadas com a do parque.

Sugere-se que a partir de então abram-se mais estudos aprofundando mais na aplicação da modelagem 3D para estudos de análise ambiental para integrar valores e agregar informações de profundidade quando disponibilizadas.

## REFERÊNCIAS

ALKMIN, F. F.; MARSHAK, S. **Transamazonian Orogeny in the Southern São Francisco Craton Region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero.** *Precambrian Research*, 1998, p. 29-58.

AQUINO, I. B. **Retrospectiva da Legislação Espeleológica Brasileira.** 2011. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Minas) – Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2011. 69f.

AULER, A. S.; PILÓ, L. B. **Introdução às cavidades em minério de ferro e canga. O Carste,** v. 17, n. 3, p. 70-72, 2005.

BABINSKI, M.; CHEMALE, F. Jr.; VAN SCHMUS, W. R. Geocronología Pb/Pb em rochas carbonáticas do Supergrupo Minas, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais Brasil. In: **Anais do III Congresso Brasileiro de Geoquímica.** São Paulo, 1991. p. 628-631.

BABINSKI, M.; CHEMALE, F. Jr.; VAN SCHMUS, W. R. A idade das formações ferríferas bandadas do supergrupo Minas e sua correlação com aquelas da África do Sul e Austrália. In: **Anais do II Simpósio do Cráton São Francisco.** Salvador, 1993. p. 152-153.

BALTAZAR, O. F.; ZUCCHETTI, M. **Lithofacies associations and structural evolution of the Archean Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero, Brazil: A review of the setting of gold deposits.** *Ore Geology Reviews*, 2005.

BRANCO, P, M. **Espeleologia: O Estudo Das Cavernas,** CPRM, 2014: <http://www.cprm.gov.br/publique/CPRM-Divulga/Canal-Escola/Espeleologia%3A-o-estudo-das-cavernas-1278.html>

BRASIL. Constituição (1988). **Constituição da República Federativa do Brasil.** Brasília - DF: Senado, 1988. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/constituicao/constituicaocompilado.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicaocompilado.htm). Acesso em: 30 abr. 2015.

BRASIL. **Decreto nº 99.556, de 1 de outubro de 1990.** Dispõe sobre a proteção das cavidades naturais subterrâneas existentes no território nacional e dá outras providências. Brasília, DF, 1 de outubro de 1990. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/decreto/1990-1994/D99556.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/1990-1994/D99556.htm). Acesso em: 30 abr. 2015.

BRASIL. **Decreto nº 6.640, de 7 de novembro de 2008.** Dá nova redação aos Arts. 1º, 2º, 3º, 4º e 5º e acrescenta os Arts. 5-A e 5-B ao Decreto nº 99.556, de 1 de outubro de 1990, que dispõe sobre a proteção das cavidades naturais subterrâneas existentes no território nacional. Brasília, DF, 7 de novembro de 2008. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2007-2010/2008/Decreto/D6640.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2008/Decreto/D6640.htm). Acesso em: 30 abr. 2015.

BRASIL. **Decreto de 13 de outubro de 2014.** Cria o Parque Nacional da Serra do Gandarela, localizado nos Municípios de Nova Lima, Raposos, Caeté, Santa Bárbara, Mariana, Ouro Preto,

Itabirito e Rio Acima, Estado de Minas Gerais. Brasília, DF, 13 de outubro de 2014. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato20111014/2014/dsn/Dsn14013.htm#:~:text=DECRETO%20DE%2013%20DE%20OUTUBRO,Acima%2C%20Estado%20de%20Minas%20Gerais](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato20111014/2014/dsn/Dsn14013.htm#:~:text=DECRETO%20DE%2013%20DE%20OUTUBRO,Acima%2C%20Estado%20de%20Minas%20Gerais)>.

BRASIL. **Instrução Normativa n° 2, de 30 de agosto de 2017**. Define a metodologia para classificação do grau de relevância de cavidades natissubterrâneas, conforme previsto no Art. 5° do Decreto n° 99.556, de 1° de outubro de 1990. Brasília, DF, 30 de agosto de 2017. Disponível em: <[https://www.in.gov.br/materia//asset\\_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/19272154/do1-2017-09-01-instrucao-normativa-n-2-de-30-de-agosto-de-2017-19272042](https://www.in.gov.br/materia//asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/19272154/do1-2017-09-01-instrucao-normativa-n-2-de-30-de-agosto-de-2017-19272042)>.

BRASIL. **Resolução n° 13, de 08 de agosto de 2019**. Estabelece medidas regulatórias objetivando assegurar a estabilidade de barragens de mineração, notadamente aquelas construídas ou alteadas pelo método denominado "a montante" ou por método declarado como desconhecido e dá outras providências. Brasília, DF, 8 de agosto de 2019. Disponível em: <<https://www.in.gov.br/web/dou/-/resolucao-n-13-de-8-de-agosto-de-2019-210037027>>.

BUCHI A. **Mapeamento geológico com aplicação do bgs digital workflow e modelagem implícita**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geologia, UFMG, Belo Horizonte, 23/03/2018

CÂMARA, G. et al. **Banco de dados geográficos**. São Paulo: MundoGEO, 2005. 506p.

CASAGRANDE, P. B. **O Framework Geodesign aplicado ao Quadrilátero Ferrífero**, Minas Gerais. UFMG, Programa de Pós-Graduação em Geografia, 2018.

CASAGRANDE, P. B. **Geologia e geoprocessamento aplicados ao ordenamento territorial**. Minas Gerais, 2019.

CECAV. **Decreto 6.640, de 7 de novembro de 2008: comentado**. Disponível em: <[http://www.icmbio.gov.br/cecav/images/download/Decreto\\_6640\\_Comentado.pdf](http://www.icmbio.gov.br/cecav/images/download/Decreto_6640_Comentado.pdf)>. Acesso em: 10 out. 2020.

CECAV. ICMBio lança Cadastro Nacional de Cavernas. 2013. Disponível em: <<http://www.icmbio.gov.br/portal/comunicacao/noticias/20-geral/4261>>. **Revista Direito Ambiental e Sociedade**, v. 8, n. 2, 2018, p. 257-280. Disponível em: <[icmbio-lanca-cadastro-nacional-de-informacoes-espeleologicas.html#!](http://icmbio-lanca-cadastro-nacional-de-informacoes-espeleologicas.html#!)>. Acesso em: 10 out. 2020.

CODEMIG. 2005. Projeto Geologia do Quadrilátero Ferrífero: SIG e Nota Explicativa.

COWAN, E. J.; BEASTON, R. K.; ROSS, H. J.; FRIGTH, W. R.; MCLENNAN, T. J.; EVANS, T. R.; CARR, J. C.; LANE, R. G.; BRIGHT, D. V.; GILLMAN, A. J.; OSCHURT, P. A.; TITLEY, M. **Practical Implicit Geological Modelling. 5th International Mining Geology Conference Proceedings, AusIMM Publication, Series 8/2003, 89-99**. 2003.

COWAN, E. J.; LANE, R. G.; ROSS, H. J. 2004. Leapfrog's implicit drawing tool: a new way of drawing geological objects of any shape rapidly in 3D, in Mining Geology 2004 Workshop (eds: M. J. Berry and M.L. Quigley), **Australian Institute of Geoscientists Bulletin**, 41: 23-25.

Dorr J. V. N. II. 1969. **Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil.** USGS/DNPM. *Professional Paper 641-A*. 110p.

DUTRA, G. M. **Síntese dos processos de gênese de cavidades em litologias de ferro.** In: CONGR. BRAS. ESPELEO., 32. Barreiras, 2013. Anais... Barreiras: SBE, p. 415-426.

ENDO, I., Galbia H.F., Delgado C.E.R., Oliveira, M.M.F, Zaparolli, A. de C., Moura, L.G.B de, Peres, G.G., Oliveira A.H. de, Zavaglia, G., Danderfer, F.A., Gomes, C.J.S., Carneiro, M.A., Nalini, Jr.H.A., Castro, P. de T.A., Suita, M.T. de F., Seixas L.A.R., Tavaza, E., Lana, C. de C., Marns-Neto, M.A., Marns, M. de S., Ferreira, F.F.A., Franco, A.P., Almeida, L.G., Rossi, D.Q., Angeli, G., Madeira, T.J.A., Piassa, L.R.A, Mariano, D.F., Mariano, D.F., Carlos, D.U. 2019. **Mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. Escala 1:50.000.** Ouro Preto, Departamento de Geologia, Escola de Minas – UFOP – Centro de Estudos Avançados do Quadrilátero Ferrífero: [www.qfe2050.ufop.br](http://www.qfe2050.ufop.br)

GANEM, Roseli Senna. **As cavidades naturais subterrâneas e o Decreto nº 6.640/2008.** Estudo. Câmara dos Deputados, Consultoria Legislativa, 2009. Disponível em: <<http://bd.camara.gov.br/bd/handle/bdcamara/2522>>.

HACK, J. T. Stream-profile analysis and stream-gradient index. **Journal of Research of the United States Geological Survey**, v. 1, n. 4, p. 421-429, 1973.

MIRANDA, Marcos Paulo de Souza. Mineração em áreas de ocorrência de patrimônio espeleológico. **MPMG Jurídico**, Belo Horizonte, edição especial, 2012.

MOURA, Ana Clara M. **Geoprocessamento na gestão e planejamento urbano.** Belo Horizonte: Edição da Autora, 2003. 294p.

MOURA, Ana Clara M. Geoprocessamento aplicado à caracterização e planejamento urbano de Ouro Preto – MG. In: XAVIER-DA-SILVA, Jorge; ZAIDAN, Ricardo. (Orgs.). **Geoprocessamento e análise ambiental – aplicações.** Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2004. p. 227.

MOURA, Ana Clara M. **A escolha de interpoladores e recursos de visualização na estruturação de bases de dados para produção de informações espaciais apoiadas por geoprocessamento.** Laboratório de Geoprocessamento da Escola de Arquitetura da UFMG. Belo Horizonte, 2012. 21 p. Apostilas. Disponível em: <<http://www.arq.ufmg.br>>.

NOCE, T. S. **Proposta de zoneamento geotécnico de cavidades naturais em formações ferríferas.** Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral. Escola de Minas. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2016.

PASSOS, R. M. **A Serra do Gandarela, uma demarcação com cartas marcadas. Centro de Tecnologia Mineral.** Instituto Universitário de Pesquisas do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2015.

Disponível em: <[bhttps://www.cetem.gov.br/images/palestras/2015/mineracao/14-rita-passos.pdf](https://www.cetem.gov.br/images/palestras/2015/mineracao/14-rita-passos.pdf)>. Acesso em: 15 out. 2020.

PINHEIRO, R. V. L.; MAURITY, C. W. 1988. **As cavidades em rochas intempéricas da Serra dos Carajás, Brasil.** In: CONGR. ESPELEO. AMER. LATINA e CARIBE. Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: SBE, p. 179-186.

SANTOS, D.J. **A geodiversidade do Parque Nacional da Serra do Gandarela: Análise do potencial de uso didático, com ênfase no patrimônio espeleológico.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, 2017.

SIMMONS, G. C. **Canga Caves in the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil.** The national speleological society bulletin 25:66-72, 1963. (traduzido por augusto auler).

TEIXEIRA, Amandio; CHRISTOFOLETTI, Antônio; MORETTI, Edmar. **Introdução aos sistemas de informação geográfica.** Rio Claro: Ed. dos Autores, 1992. 80 p.

THOMÉ, R. **O princípio da vedação de retrocesso socioambiental no contexto da sociedade de risco.** Salvador: Juspodivm, 2014.

TOMLIN, Dana. **Geographic Information Systems and cartographic modeling.** New Jersey: Prentice Hall, Englewood Cliffs. 1990. 249p.

TRAVASSOS, L.E.P. **princípios de carstologia e geomorfologia cárstica Espeleologia, ICMBIO, 2019**

VALERIUS, M. B. **Cadastro e análise do potencial de risco das barragens de rejeitos de mineração do Estado de Goiás.** 2014. Dissertação de Mestrado – UnB. Distrito Federal, 2014. 105 p.

ZWOLINSKI, Z. Geodiversity. In: GOUDIE, A. (Ed.). **Encyclopedia of Geomorphology.** Routledge: 2004. p. 417-418.