



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**GEOFÍSICA APLICADA A ÁREAS SUSCETÍVEIS À SUBSIDÊNCIA
CÁRSTICA EM CURVELO-MG**

Victor Lunardi Toledo

MONOGRAFIA nº 407

Ouro Preto, agosto de 2021

**GEOFÍSICA APLICADA A ÁREAS SUSCETÍVEIS À
DEFLAGRAÇÃO DE SUBSIDÊNCIA CÁRSTICA EM
CURVELO - MG**



FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO

Reitora

Prof.^a Dr.^a Cláudia Aparecida Marlière de Lima

Vice-Reitor

Prof. Dr. Hermínio Arias Nalini Júnior

Pró-Reitora de Graduação

Prof.^a Dr.^a Tânia Rossi Garbin

ESCOLA DE MINAS

Diretor

Prof. Dr. Issamu Endo

Vice-Diretor

Prof. Dr. Hernani Mota de Lima

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

Chefe

Prof. MSc. Edison Tazava

MONOGRAFIA

Nº 407

**GEOFÍSICA APLICADA A ÁREAS SUSCETÍVEIS À SUBSIDÊNCIA
CÁRSTICA EM CURVELO-MG**

Victor Lunardi Toledo

Orientadora

Prof.^a Dr.^a Maria Silvia Carvalho Barbosa

Co-Orientador

Julio César Lana

Monografia do Trabalho de Conclusão de curso apresentado ao Departamento de Geologia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para avaliação da disciplina Trabalho de Conclusão de Curso – TCC 402, ano 2020/2.

OURO PRETO

2021

Universidade Federal de Ouro Preto – <http://www.ufop.br>
Escola de Minas - <http://www.em.ufop.br>
Departamento de Geologia - <http://www.degeo.ufop.br/>
Campus Morro do Cruzeiro s/n - Bauxita
35.400-000 Ouro Preto, Minas Gerais
Tel. (31) 3559-1600, Fax: (31) 3559-1606

Direitos de tradução e reprodução reservados.

Nenhuma parte desta publicação poderá ser gravada, armazenada em sistemas eletrônicos, fotocopiada ou reproduzida por meios mecânicos ou eletrônicos ou utilizada sem a observância das normas de direito autoral.

Catálogo elaborado pela Biblioteca Prof. Luciano Jacques de Moraes do
Sistema de Bibliotecas e Informação - SISBIN - Universidade Federal de Ouro Preto

<http://www.sisbin.ufop.br>

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

T649g Toledo, Victor Lunardi.

Geofísica aplicada a áreas suscetíveis à subsidência cárstica em
Curvelo- MG. [manuscrito] / Victor Lunardi Toledo. - 2021.
73 f.: il.: color., gráf., tab., mapa.

Orientadora: Profa. Dra. Maria Sílvia Carvalho Barbosa. Coorientador:
Me. Júlio César Lana.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de
Minas. Graduação em Engenharia Geológica .

1. Geofísica. 2. Carste. 3. Dolinas (Geologia). I. Barbosa, Maria Sílvia Carvalho.
II. Lana, Júlio César. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 550.3:624.131.5

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526

Ficha de Aprovação

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**TÍTULO: GEOFÍSICA APLICADA A ÁREAS SUSCETÍVEIS À SUBSIDÊNCIA CÁRSTICA
EM CURVELO-MG**

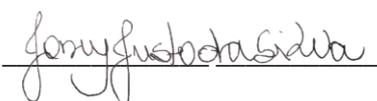
AUTOR: Victor Lunardi Toledo

ORIENTADORA: Maria Sílvia Carvalho Barbosa

Aprovado em:

BANCA EXAMINADORA:

Prof.^a Dr.^a Maria Sílvia Carvalho Barbosa  DEGEO/UFOP

Prof. Dr. Joney Justo da Silva  DEGEO/UFOP

Dr.^a Sandra Fernandes da Silva Sandra fernandes da Silva SUPLAN/CPRM

Ouro Preto, 03/09/2021

AGRADECIMENTOS

Por minha evolução profissional e pessoal, pública e gratuita, dedico ao povo brasileiro esta conquista. Agradeço primeiramente a Silvana, minha mãe, pela dedicação e amor incondicionais. Ao meu pai, Rogério e aos meus irmãos; Danielli, Stéphanou, Laura e Giovanna agradeço por me fazerem ser quem sou, só nós sabemos o quão dura foi caminhada até aqui, amo vocês. À Verônica, meu amor e melhor amiga, obrigado por sempre acreditar em mim. Aos meus padrinhos, João e Lília, sou grato pelo apoio na concretização desse sonho e por serem a bússola moral na vida desse geólogo.

Pela prosa boa e o ombro amigo agradeço aos amigoSS de infância que trouxe comigo, em especial aos amigos Miguel e Daniel, o tempo longe nunca foi páreo para uma mesa de buteco. Ao Morfeu, meu fiel amigo, obrigado por me fazer crescer. Um especial agradecimento ao meu primo Luis Philippe e aos amigos Pâmela, Brenda, Ariela, Elis, Gabriel, Pedro, Christiane, João, Ramón, Paula, Maria, Lucas e a turma do 14.2. Sem vocês ao lado os morros jamais seriam subidos e as pedras quebradas. Às famílias Lunardi, Toledo e Horta agradeço o acolhimento e aos exemplos que tive.

Por me tornarem geólogo agradeço à minha universidade, à gloriosa Escola de Minas, aos professores, funcionários e amigos do DEGEO, SICEG, SGA, DEGET/CPRM e aos guerreiros da TriStar Gold: FM, FB, PA, AN, VD, SS, RS, RR, WS e MC. Por serem exemplos de dedicação à coisa pública e de amor pela geologia sou especialmente grato aos meus mestres M^a Sílvia, Cláudio, Max, Júlio e Sandra.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 APRESENTAÇÃO	1
1.2 LOCALIZAÇÃO E VIAS DE ACESSO	2
1.3 OBJETIVOS	3
1.4 JUSTIFICATIVA	3
1.5 METODOLOGIA	4
2 ÁREA DE ESTUDO	7
2.1 GEOMORFOLOGIA	7
2.2 RECURSOS HIDRICOS	10
2.3 CLIMA	11
2.4 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL	12
2.5 GEOLOGIA LOCAL	16
3 CARSTE	19
3.1 DEFINIÇÃO	19
3.2 DISSOLUÇÃO	21
3.3 DOLINAS	26
3.4 INFLUÊNCIA HUMANA EM SUBSIDÊNCIAS CÁRSTICAS	30
3.5 O CARSTE DE CURVELO	31
4 MÉTODOS GEOFÍSICOS	35
4.1 MAGNETOMETRIA	35
4.2 RADIOMETRIA	40
5 ANÁLISE QUALIQUANTITATIVA	43
5.1 BANCO DE DADOS	43
5.2 ANÁLISE MAGNETOMÉTRICA	44
5.3 ANÁLISE RADIOMÉTRICA	52
6 INTEGRAÇÃO GEOFÍSICA-GEOLÓGICA	57
6.1 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	57
6.2 MAPA DE ÁREAS POTENCIAIS	64
7 CONCLUSÕES	67
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Localização da área do município de Curvelo e seus distritos sobre o relevo sombreado ALOS PALSAR com exagero vertical de duas vezes.....	2
Figura 1.2 – Fluxograma das etapas metodológicas do trabalho.....	4
Figura 2.1 – Mapa de declividades e compartimentação geomorfológica do município de Curvelo.....	8
Figura 2.2 – Localização dos poços cadastrados no Sistema de Águas Subterrâneas para o Município de Curvelo.	11
Figura 2.3 – Dados termopluviométricos do município de Curvelo	12
Figura 2.4 – A bacia do São Francisco e as faixas/cinturões de dobramentos delimitantes.....	13
Figura 2.5 – Sessão sísmica regional da Bacia sedimentar do São Francisco, delimitando as superseqüências estratigráficas de preenchimento, estruturação e limites marginais propostos	14
Figura 2.6 – Coluna estratigráfica do Grupo Bambuí demonstrando a relação entre suas principais unidade	15
Figura 2.7 – A) Mapa litológico bruto do município de Curvelo (destacado em cinza) e adjacências, B) articulação das folhas.	17
Figura 3.1 – Planisfério destacando a distribuição das regiões cársticas mundiais.....	19
Figura 3.2 – Áreas potenciais e cavernas cadastradas no CANIE (Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas) até 2018.	21
Figura 3.3 – Modelo computacional de alargamento de discontinuidades em terrenos cársticos. Os modelos (a) e (b) representando a dissolução ao longo de juntas e fraturas	22
Figura 3.4 – Evolução dos tipos de carste a partir dos domínios da espeleogênese epigênica e hipogênica.....	24
Figura 3.5 – Feições do relevo cárstico.....	25
Figura 3.6 – Epicarste representado em duas condições. A esquerda com a presença de cobertura de solo e a direita sob um campo de lapíás.	26
Figura 3.7 – Evolução e desenvolvimento de uma dolina de dissolução a partir de um conduto preferencial.....	27
Figura 3.8 – Classificação genética de dolinas.....	28

Figura 3.9 – Perfis demonstrando a evolução em quatro estágios de uma dolina de colapso em calcário em Papua Nova Guiné.....	29
Figura 3.10 – Formação de dolinas de colapso em coberturas coesas sobre carste subjacente.	29
Figura 3.11 – Formação de dolinas de sufusão em sedimentos inconsolidados.	30
Figura 3.12 – Descrição geológica do poço 3100016927 cadastrado no SIAGAS perfurado à leste da sede municipal de Curvelo.	32
Figura 3.13 – Feições elípticas, com degraus de abatimento geradas após o evento de subsidência..	33
Figura 3.14 – Pseudossessão eletroresistiva por caminhamento elétrico elaborada por Andrade <i>et al.</i> (2019) indicando anomalia resistiva (cavidade) a aproximadamente 30 m de profundidade.	33
Figura 4.1 – A) Componentes vetoriais do campo magnético terrestre total B); B) variação da inclinação magnética conforme a latitude	36
Figura 4.2 – Suscetibilidade magnética de algumas rochas da crosta terrestre.....	37
Figura 4.3 – Conteúdo de elementos radioativos nos diferentes tipos e composições de rochas.....	41
Figura 5.1 – Localização da área 10 dos Programas de Levantamento Aerogeofísico de Minas Gerais (PLAMG) utilizado neste trabalho.	44
Figura 5.2 – Fluxograma dos mapas magnetométricos gerados: DX– primeira derivada horizontal (E-W); DY – primeira derivada horizontal (N-S); DZ – primeira derivada vertical; DZ2 - segunda derivada vertical; ASA – Amplitude do Sinal Analítico.....	45
Figura 5.3 – A) Mapa de magnetofácies obtidos a partir do mapa de amplitude do sinal analítico; B) Mapa de amplitude do sinal analítico.....	47
Figura 5.4 – A) Mapa de lineamentos magnéticos, obtidos a partir do mapa ASA.; B) Roseta com as direções preferenciais e dados estatísticos.	48
Figura 5.5 – Mapa ASA com a localização dos perfis traçados para a deconvolução de Euler. Em preto, destacam-se os lineamentos magnéticos identificados próximos a Curvelo denominados de AZ-150.	49
Figura 5.6 - Distribuição estatística da profundidade calculada para as anomalias magnéticas	49
Figura 5.7 – Resultado tridimensional da Deconvolução de Euler para os 10 perfis com exagero vertical 5x. Sobrepondo-os o mapa de Amplitude do Sinal Analítico.	50
Figura 5.8 – Fluxograma espacial com o resultado da Deconvolução de Euler. A superfície de interpolação apresenta exagero vertical de 5x.....	51

Figura 5.9 – Deconvolução de Euler do perfil L5. A) Dado original de ASA, B) gradiente H (vermelho) e V (preto), C) Estimativa de profundidade.....	52
Figura 5.10 – Fluxograma dos mapas radiométricos gerados: Na primeira coluna, os mapas de canal isotópico gerados: potássio (K), tório (Th) e urânio (U)	53
Figura 5.11 – A esquerda, radiofácies subdividindo imagem ternária; A direita, radiofácies subdividindo os mapas de canal (K, U e Th) e imagem ternária crua, respectivamente.	54
Figura 6.1 – Ilustração da análise conjunta entre os mapas geológicos e geofísicos.	57
Figura 6.2 – A) Mapa de radiofácies. B) Imagem ternária.....	58
Figura 6.3 – Ajustes efetuados (em vermelho) a partir dos mapas radiométricos no mapa litológico da área de estudo.	59
Figura 6.4 – Mapa de campo anômalo com a anomalias elipsoidal e linear destacada.....	60
Figura 6.5 – A) Mapa de derivada horizontal DX evidenciando lineamentos com direção predominantemente N-S.....	61
Figura 6.6 –A) Mapa geológico da área de estudo subdividido pelos domínios morfoestrutural leste e oeste.	62
Figura 6.7 – Perfil de Deconvolução de Euler da Linha 5 distinguindo a profundidade das anomalias relacionadas ao domínio Oeste e Leste.....	63
Figura 6.8 – Malha de Deconvolução de Euler demonstrando a relação entre os lineamentos magnéticos e o desenvolvimento do carste da região ao longo dessas discontinuidades.....	63
Figura 6.9 – Modelo indicativo das áreas com potencial à deflagração de colapsos e subsidências cársticas baseado em dados geofísicos regionais.....	65

ÍNDICE DE QUADROS E TABELAS

Quadro 1.1 – Histórico dos eventos de colapsos e subsidência em terrenos cársticos no Brasil até 2008	3
Quadro 2.1 – Compartimentação geomorfológica do município de Curvelo	9
Quadro 3.1 – Influência do clima na evolução de terrenos cársticos.	23
Quadro 4.1 – Índices estruturais N para dados magnetométricos relacionados às estruturas.39	
Tabela 4.1 – Filtros de Fourier e suas respectivas finalidades geofísicas.....	38
Tabela 5.1 – Magnetofácies baseadas nas intensidades de magnetização e comprimento de onda dadas pelo mapa de Amplitude do Sinal Analítico.....	46
Tabela 5.2 – Tabela com os dados espaciais de cada perfil calculado.	50
Tabela 5.3 – Radiofácies determinadas, principalmente, a partir da análise da imagem Ternária e secundariamente com os mapas de canal.	55

Resumo

Subsidências de terreno são processos geológicos frequentemente associados a danos urbanos em ambientes cársticos. A carstificação, ou formação de feições cársticas, se desenvolve basicamente a partir de três condicionantes principais: clima úmido, presença de substrato solúvel e presença de descontinuidades nas rochas nesse substrato. O processo de subsidência ocorre naturalmente nesses ambientes e é potencializado por ação antrópica, se desencadeando a partir da dissolução do substrato com a posterior instabilização da cavidade e, por fim, o abatimento do terreno. Sob um contexto favorável à carstificação, o município de Curvelo - MG foi acometido em 2019 pela deflagração de evento causador de uma série de deformações em superfície, que culminaram com a remoção e realocação da população local. Estudos realizados pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM), no mesmo ano confirmaram como causa à deflagração da subsidência o processo colapso de cavidades na região. O trabalho buscou, como fim, auxiliar à gestão de áreas de risco geológico, do município e imediações, a partir da indicação de áreas com o potencial para a deflagração desses processos e formação de feições comumente denominadas de dolinas. Para isso, realizou uma análise geofísica regional, radiométrica e magnetométrica, buscando a identificação de substratos solúveis e presença de descontinuidades nas unidades estratigráficas presentes, próximas ao município. A análise geofísica a partir de dados de aerolevados permitiu caracterizar regionalmente fácies e lineamentos geofísicos capazes de determinar áreas propícias ao desenvolvimento desse problema geotécnico e urbano.

Palavras-chave: Carste, Subsidência, Geofísica, Curvelo.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO

Subsidências são fenômenos de origem geológica que se tornam cada vez mais danosos às cidades à medida que a expansão urbana avança sobre terrenos cársticos. Segundo dados levantados pelo Serviço Geológico do Brasil em mais de 1600 municípios do país, cerca de 1376 pessoas encontram-se em áreas de risco alto e muito alto para a deflagração desse processo (Toledo & Lana 2019). Espera-se que esse número cresça à medida que mais municípios sejam mapeados e a expansão urbana evolua nas cidades.

Terrenos cársticos apresentam uma fragilidade ambiental peculiarmente elevada devido a conexão direta entre suas características hidrológicas e hidrogeológicas. A deflagração de desastres nesses ambientes se difere muito de outros terrenos. Colapsos naturais ou antropogênicos, deslizamento de encostas favorecida por condutos e cavernas, inundações instantâneas causadas pela incapacidade do sistema em escoar a água de uma tempestade e a poluição do aquífero causada direta ou indiretamente por ações humanas são tipos de degradação mais comuns aos ambientes cársticos (Parise 2015).

Embora seja um fenômeno natural, subsidências em terrenos cársticos são muitas vezes potencializadas por atividades humanas como a sobrecarga do terreno por edificações, exploração mal dimensionada de água do aquífero ou por vazamentos na rede de abastecimento hídrico e de esgoto (Waltham *et al.* 2005). Esses agravantes tornam a área afetada uma área de risco geológico relevante, uma vez que a deflagração de tal processo poderá prejudicar patrimônios públicos e privados no município.

Situado na mesorregião centro-mineira, o município de Curvelo encontra-se geologicamente na borda oriental sul do Cráton São Francisco, aflorando nessa região rochas metassedimentares proterozoicas recobertas por conjuntos sedimentares recentes (Costa *et al.* 2012) sendo a unidade mais expressiva representada pelo Grupo Bambuí, composto por unidades metapelíticas relacionadas a Formação Serra de Santa Helena e rochas carbonáticas atribuídas às Formações Sete Lagoas e Lagoa do Jacaré. Em consequência a esse substrato calcário, ocorrem na região feições relacionadas ao relevo cárstico, como cavernas e dolinas.

Sob tais circunstâncias, busca-se com o presente Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) associar características geofísicas e geológicas para a definição de áreas com o potencial à deflagração de subsidências e colapsos de terrenos cársticos na região de Curvelo – MG.

1.2 LOCALIZAÇÃO E VIAS DE ACESSO

O município de Curvelo, foco do presente estudo, se localiza na região central do estado de Minas Gerais - Brasil, abrangendo quatro folhas topográficas, de escala 1:100.000, produzidas pelo IBGE e posteriormente utilizadas de base para mapeamento geológico pela CPRM, são elas: Andrequicé (SE-23-Z-A-II), Corinto (SE-23-Z-A-II), Morro da Garça (SE-23-Z-A-IV), Curvelo (SE-23-Z-A-V), Pompéu (SE-23-Z-C-1) e Sete Lagoas (SE-23-Z-C-II), possui uma área total de 3296,2 Km² limitada pelos meridianos 44°46'46" W/44°04'26" W e paralelos 18°16'35" S/19°13'23" S.

Situado a 164 Km de Belo Horizonte, o município é acessado pela rodovia BR-040 (Rio-Brasília) em direção a Brasília seguindo até o trevo de Caetanópolis, acessando a MG-231 até Cordisburgo pegando o acesso da MG-754 até Curvelo. O município de Curvelo possui cinco distritos ao todo, são eles Tomás Gonzaga a norte, Angueretá a sudoeste, Santa Rita do Cedro a leste, JK a sul e, ao centro, a sede municipal.

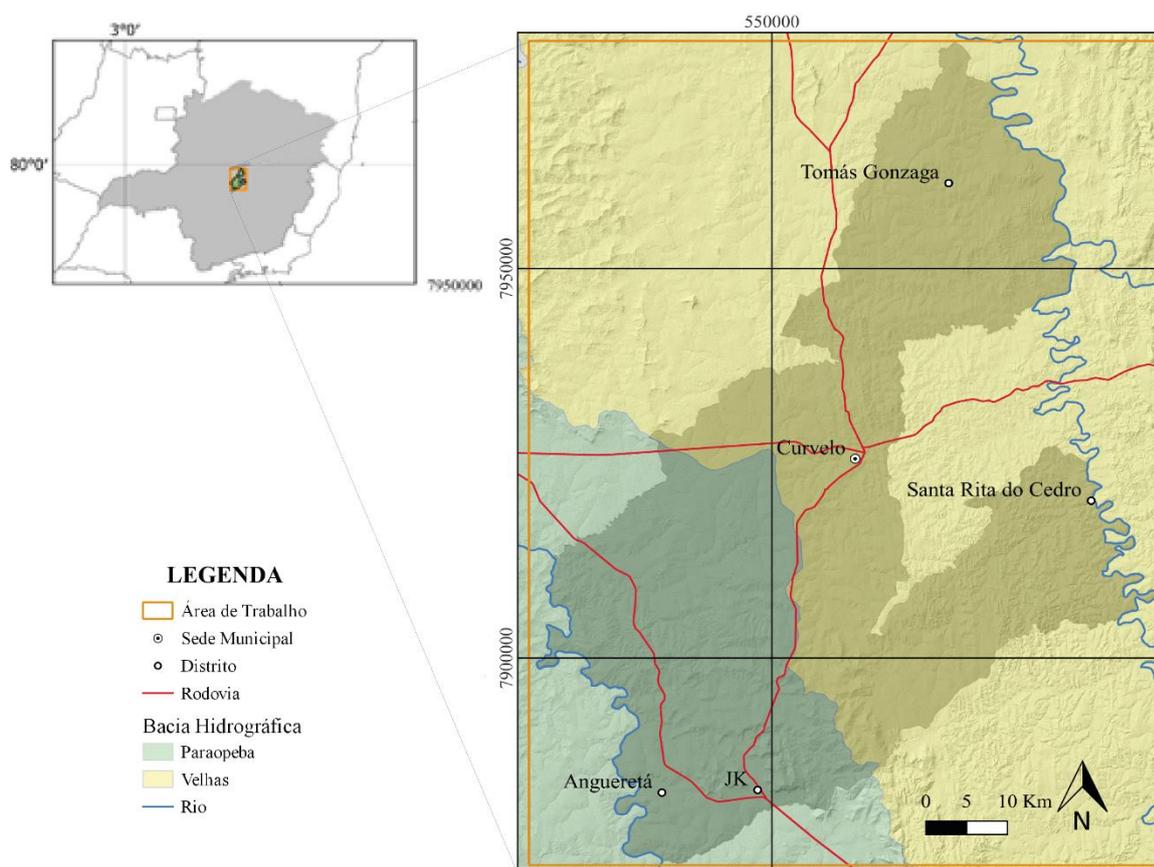


Figura 1.1 – Localização da área do município de Curvelo e seus distritos sobre o relevo sombreado ALOS PALSAR com exagero vertical de duas vezes.

1.3 OBJETIVOS

O presente estudo tem como objetivo identificar regiões propícias ao desenvolvimento de subsidências e colapsos cársticos em Curvelo – MG e compreender a influência de fatores geológicos e estruturais na potencialização desses eventos, por meio de análise geofísica.

1.4 JUSTIFICATIVA

As peculiaridades geológicas e hidrogeológicas tornam os ambientes cársticos altamente vulneráveis devido a conexão direta entre suas regiões superficiais com as subsuperficiais. Essas particularidades tornam esses ambientes vulnerável a diferentes tipos de desastres naturais, tais como as subsidências de terreno, inundações causadas por incapacidade do aquífero cárstico dar vazão à tempestades severas e a poluição direta desses aquíferos.

Subsidências são o fenômeno danoso de natureza geológica mais comum e intrinsecamente relacionados a esses terrenos (Parise 2015), ocorrendo naturalmente ou induzidos pela ocupação humana. Sallun Filho (2015) sistematiza o histórico levantado por Santos (2008) das ocorrências de subsidências em terrenos cársticos do Brasil no Quadro 1.1. Santos (*op cit.*) ainda ressalta que “*muitos outros eventos similares de afundamentos de terrenos já aconteceram por todo o país, e que, por não terem causado danos maiores, não obtiveram repercussão de mídia e a devida atenção de especialistas para sua análise e registro técnicos*”.

Quadro 1.1 – Histórico dos eventos de colapsos e subsidência em terrenos cársticos no Brasil até 2008. Extraído de Sallun Filho (2015).

1981	Mairinque – SP	Várias edificações apresentaram trincas e afundamentos de piso
1986	Cajamar – SP	Colapso e subsidência de grandes proporções, impactantes por ocorrerem em plena área urbana. Cerca de 60 dias após os primeiros sinais, na principal área atingida três casas haviam sido tragadas em uma cratera de cerca de 30 metros de diâmetro e 15 metros de profundidade, enquanto recalques e trincas afetaram dezenas de outros imóveis até distâncias de 400 metros do local.
1988	Sete Lagoas – MG	Afundamento de cerca de 20 metros de diâmetro e 5 de profundidade tragou parte da arquibancada do Estádio Municipal, muros e paredes de edificações próximas, sendo que sinais de movimentação foram observados em edificações situadas em um raio de 40 metros.
1992	Almirante Tamandaré – PR	Vários pequenos afundamentos de terreno, trincas de edificações, inclinações de edificações, descolamento entre alvenaria e peças estruturais, rebaixamento do nível d’água em poços, cacimbas e pequenos lagos.
1999	Teresina – PI	Grande afundamento com comprometimento total de várias edificações.
1999	Cajamar – SP	Parte das edificações da moderna fábrica da Natura (Cosméticos) sofreu danos estruturais advindos de afundamentos em suas fundações.
2007	Almirante Tamandaré – PR	Um dos maiores afundamentos de que se tem notícia na região, com forma elipsoidal, 50 metros de comprimento, 40 metros de largura e cerca de 30 metros de profundidade.
2007	Bocaiuva do Sul – PR	Colapso com uma cratera de 5 metros de diâmetro e 5 metros de profundidade.

A cada censo demográfico, o município de Curvelo apresenta uma maior parcela de população urbana entre os seus habitantes (IBGE 2010), realidade que contribui enormemente com a ocupação de áreas até então desocupadas ou ruralizadas da região municipal. Em 2019, a rua Mato da Lagoa, no bairro Jockey Club, foi acometida pela provável subsidência do terreno gerando grandes rachaduras em casas próximas e no asfalto deixando seis famílias impedidas de voltar a suas casas. Sob esse contexto uma diferente abordagem é necessária para o direcionamento da urbanização do município, levando em conta sua particularidade geológica favorável ao desenvolvimento de subsidências cársticas. Esse trabalho busca auxiliar com um método pouco dispendioso e regional, a delimitação de áreas com características geológicas e geofísicas propícias para a deflagração desses fenômenos, como forma de orientar o uso e ocupação do município, prevenindo perdas patrimoniais.

1.5 METODOLOGIA

A realização deste trabalho foi baseada em uma sequência metodológica (Figura 1.2) empregada em diversos trabalhos de conclusão de curso elaborados no Departamento de Geologia da Universidade Federal de Ouro Preto, para abordagens baseadas em análises geofísicas. Dessa forma, ele foi dividido em cinco etapas, sendo elas: revisão bibliográfica, levantamento dos bancos de dados geológico e geofísico, análise geofísica quali-quantitativa, integração geológico-geofísica e, por fim, a proposição de um modelo de áreas potenciais.

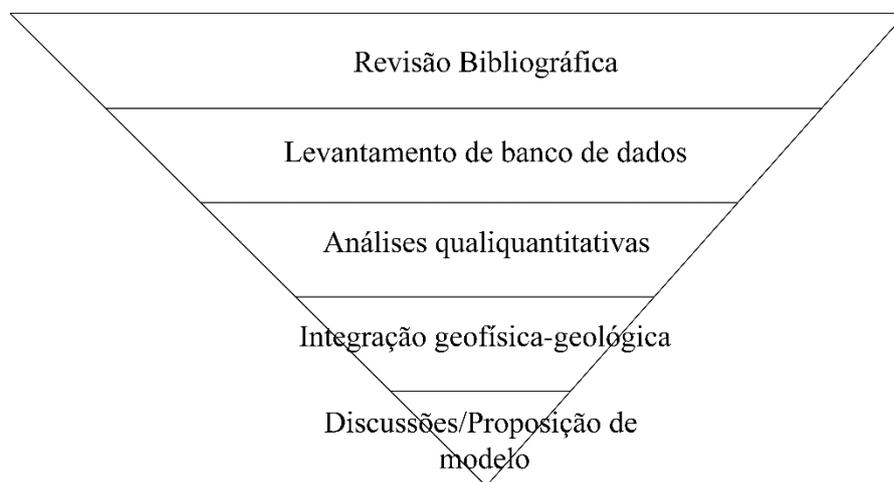


Figura 1.2 – Fluxograma das etapas metodológicas do trabalho

1.5.1 Revisão bibliográfica

A revisão bibliográfica executada por este estudo buscou compreender as características da região e embasar conceitos aqui considerados. Os principais temas foram: métodos geofísicos regionais magnéticos e radiométricos; a geologia do cráton e bacia São Francisco; e terrenos cársticos com suas

feições de instabilidade. Em relação aos fenômenos e conceitos dessa forma de relevo, o presente estudo se baseou conceitualmente, pelas obras “*Karst Hydrogeology and Geomorphology*” de Ford & Williams, (2007), “*Sinkholes and Subsidence*” de Waltham *et al.* (2005) e pela revisão sobre dolinas realizada por Gutiérrez *et al.* (2014). Os conceitos e abordagens geofísicas foram baseados nos trabalhos de Telford *et al.* (1990), Kearey *et al.* (2009). A interpretação litoestrutural para a bacia São Francisco foi fundamentada por Alkmim & Martins-Neto (2001) e Romeiro-Silva & Zalán (2005).

1.5.2 Levantamento de banco de dados

A interpretação geológica do presente trabalho se baseou nos mapeamentos geológicos realizados pela CPRM em parceria com a UFMG (Universidade Federal de Minas Gerais) no programa *Geologia do Brasil*. Os bancos de dados aeromagnetométrico e aeroradiométrico utilizados correspondem à área 10 disponibilizada pela CODEMIG (Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais), levantados ao longo de 2005 e 2006. A descrição litológica de poços perfurados na área de estudo, são referentes aos dados cadastrados até 08 de julho de 2021 no Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS).

1.5.3 Análises qualiquantitativa

O mapeamento de Geodiversidade do estado de Minas Gerais realizado pela CPRM, disponibilizado em Machado (2010), além do trabalho de Salles & Galvão (2020), consideram a suscetibilidade à dissolução das rochas superficiais como um dos parâmetros utilizados para selecionar áreas de especial interesse para o desenvolvimento de cavidades subterrâneas. Além dessa abordagem em superfície, o presente trabalho também considerou o desenvolvimento de dolinas de subsidência em coberturas não solúveis, a partir da dissolução de rochas carbonáticas subjacentes à cobertura ou intraestratais como classificado por Klimchouk & Ford (2000) e Gutiérrez *et al.* (2008). A caracterização de radiofácies a partir do levantamento radiométrico, desempenhada por este trabalho, possibilitou o aperfeiçoamento dos limites e contatos dessas áreas de litologias mais solúveis.

A influência de descontinuidades tectônicas para o condicionamento das dimensões e direção de cavidades em terrenos cársticos é bem estabelecida na literatura (e.g. Ford & Williams 2007, Waltham *et al.* 2005, Bögli 1980). O presente estudo utilizou de levantamento magnetométrico regional para a definição de *trends* e domínios morfoestruturais capazes de condicionar o desenvolvimento de cavidades na região de Curvelo.

O levantamento de feições de subsidência e o levantamento geométrico realizados pela CPRM (Goes & Lana 2019, Andrade *et al.* 2019), em resposta ao evento deflagrado na R. Mato da Lagoa, permitiu compreender alguns mecanismos e tipologia dos processos de subsidência presentes na região. O trabalho buscou interpretar o evento à luz da classificação proposta por Gutiérrez *et al.* (2008).

O banco de dados aerogeofísicos de magnetometria e radiometria foram tratados a partir do *software Oasis Montaj 8.4.1* do sistema *GEOSOFT*. A partir do tratamento desse banco de dados foram elaborados mapas de distribuição das propriedades geofísicas, mapas de filtro e de razões isotópicas. A visualização tridimensional de estruturas regionais foi possibilitada pela utilização do *software EULDEP* com a inversão dos dados magnéticos pelo tratamento matemático da Deconvolução de Euler.

1.5.4 Integração geofísica-geológica

Os mapas geofísicos, elaborados a partir de ambiente SIG pelos *softwares* ArcGIS 10.3 e QGIS 3.2, possibilitaram a definição de classes litológicas, radiométricas, morfoestruturais e estruturas lineares capazes de condicionar o desenvolvimento de cavidades na área de estudo. Os dados regionais obtidos foram analisados e validados a partir de características geológicas e geofísicas apresentadas localmente na região com o histórico de deflagração em Curvelo, na Rua Mato da Lagoa.

1.5.5 Definição de modelo potencial

O presente trabalho buscou definir, a partir de um tratamento dos dados geofísicos regionais, áreas georreferenciadas com características favoráveis à deflagração de subsidiências e colapsos cársticos. Duas condicionantes principais foram levadas em consideração para a definição das áreas suscetíveis na região de Curvelo e adjacências: a existência de substrato solúvel próximo a superfície; e a proximidade a descontinuidades mapeáveis por aeromagnetometria.

CAPÍTULO 2

ÁREA DE ESTUDO

Este capítulo discorrerá sobre a fisiografia da área municipal de Curvelo, abordando assim, aspectos geomorfológicos, climáticos, hidrológicos e geológicos da região.

2.1 GEOMORFOLOGIA

A Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais (CETEC 1983) classifica toda a área municipal de Curvelo como inserida na unidade geomorfológica denominada Depressão Sertaneja São Franciscana. Este domínio apresenta relevo acidentado, cujas altitudes variam entre 100 e 500 m, com algumas áreas apresentando elevações entre 500 e 800 m, além de alguns picos que atingem cotas acima de 800 m.

O Plano Diretor Participativo e Integrado do Território Municipal / Área Rural de Curvelo (IDM 2008) define seis compartimentos de relevo no município, se baseando em regiões homólogas em declividade, hidrografia e uso e ocupação do solo, apresentadas na Figura 2.1 e descritas no Quadro 2.1.

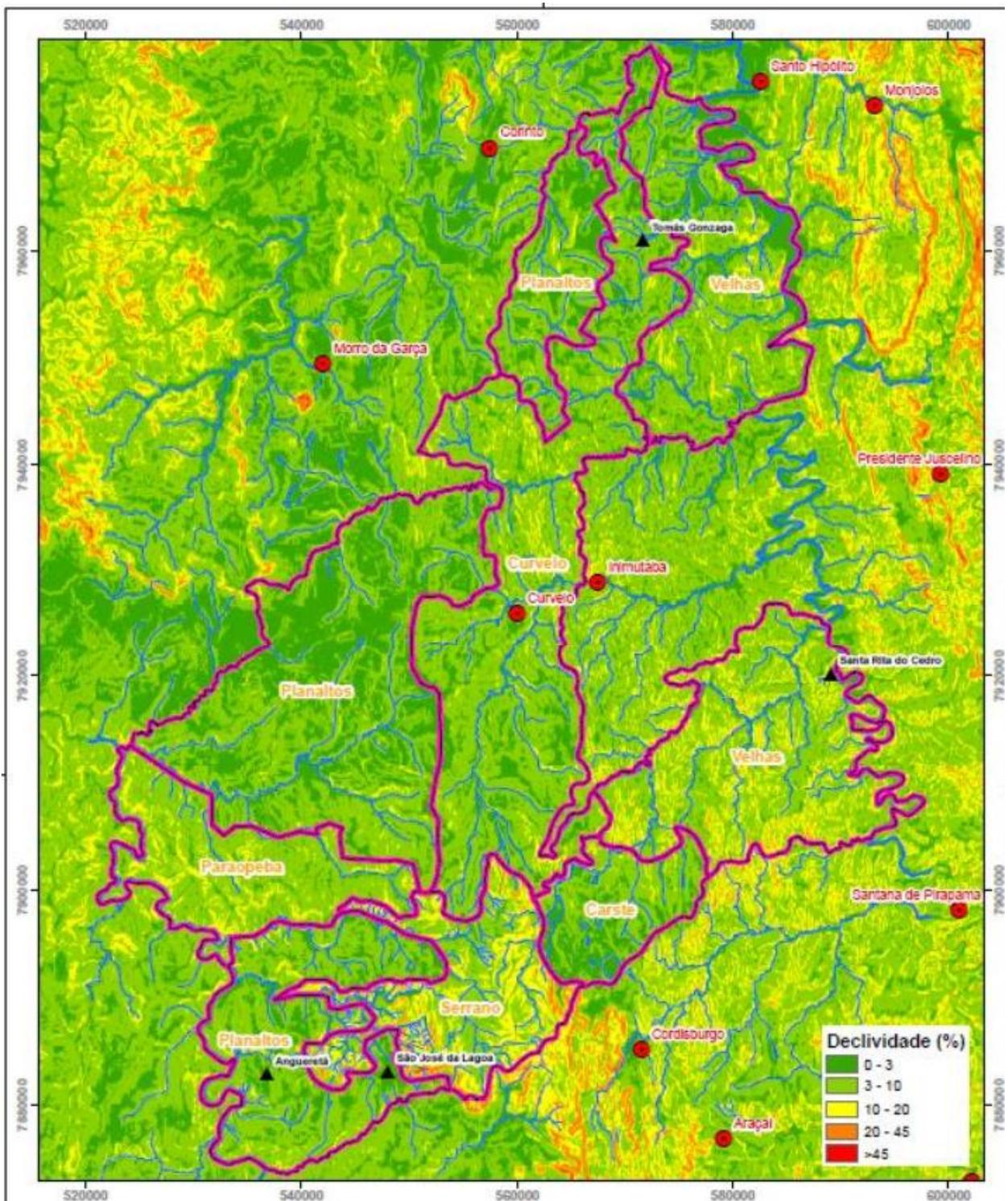


Figura 2.1 – Mapa de declividades e compartimentação geomorfológica do município de Curvelo. Extraído de MYR Projetos(2016).

Quadro 2.1 – Compartimentação geomorfológica do município de Curvelo. Extraído de MYR Projetos (2016)

Domínio	Localização	Relevo	Vegetação	Peculiaridade
Serrano	Localizado na porção sudeste do território.	Relevo com altas declividades e as maiores cotas altimétricas do município, entre 780m e 1040m.	Predomina a tipologia vegetal de campo limpo, comuns em regiões de maiores declividades	Abriga nascentes de importantes cursos d'água, tais como do Ribeirão do Leitão e do Ribeirão Maquiné.
Planaltos	Localizado nas porções noroeste, centro-oeste e sudoeste do território.	Caracterizado, principalmente, por sua descontinuidade espacial. Apresenta relevo aplainado e, por conseguinte, as menores classes de declividades do município.	Predomínio de eucalipto. No entanto, ainda se percebe grandes áreas com vegetação nativa, (cerrado).	Maior diversidade de cultivos mecanizados
Paraopeba	Localiza-se na porção extremo oeste do território.	Representado pela margem direita do Rio Paraopeba e seus afluentes, este compartimento caracteriza-se por apresentar um relevo suavemente ondulado.	Predomínio do campo limpo.	Possui solo pobre em nutrientes, o que não favorece o desenvolvimento de cultivos.
Velhas	Localiza-se nas porções leste e nordeste do território.	Representado pela margem esquerda do Rio das Velhas e seus afluentes diretos. Possui relevo relativamente ondulado em sua porção leste com vales encaixados.	Formação vegetal predominantemente campo limpo e áreas de pastagem.	Na porção nordeste observa-se relevo suavemente ondulado, onde, também, podem ser encontrados fragmentos de relevo cárstico e de mata semidecídua com transição para mata decídua.
Carste	Localizado na porção sudeste, próxima aos limites com o município de Cordisburgo.	Relevo suavemente ondulado.	Possui extensas porções com diversos cultivos irrigados e mecanizados.	Este compartimento é caracterizado pela presença de áreas cársticas.
Curvelo	Desde o extremo norte do território municipal até sua porção central, abrigando o distrito sede de Curvelo.	Relevo suavemente ondulado.	Vegetação diversificada: plantada, nativa e em regeneração.	Representa as vertentes do Ribeirão Santo Antônio e Riacho Fundo.

2.2 RECURSOS HIDRICOS

2.2.1 Hidrografia Superficial

O município de Curvelo está inserido predominantemente na bacia do Rio das Velhas (Figura 2.2), cujos principais cursos hídricos, o Ribeirão Santo Antônio e o Ribeirão Picão drenam às regiões municipais norte, nordeste e leste. As regiões sul e sudeste são drenadas pela bacia do Rio Paraopeba, rio que delimita a área municipal à sudoeste. Ambos os rios afluentes do Rio São Francisco, o primeiro desaguando no município de Pirapora, MG e o segundo com sua foz na represa de Três Marias, em Felixlândia. MG (CPRM 1998).

2.2.2 Hidrogeologia

A região do município, se situa sobre um sistema de aquíferos essencialmente cársticos, onde o armazenamento hídrico ocorre em regiões de porosidade secundária em calcários e dolomitos, formados por zonas de dissolução. Tal sistema de aquífero se estende desde o norte da região metropolitana de Belo Horizonte, MG até Montes Claros, MG, principalmente nas regiões onde afloram rochas carbonáticas do Grupo Bambuí (MYR Projetos 2016).

Segundo a Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA), todo o serviço de abastecimento da sede municipal se dá através de nove poços profundos com produção de 309 L/s. Já a população das localidades rurais faz uso da água, em sua grande maioria, advinda de poços artesianos (MYR Projetos 2016).

Existem cadastrados no Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS), 254 poços no município de Curvelo, destes, pelo menos 42 poços com perfis construtivo e geológico completos, bombeiam água de aquíferos cársticos (Figura 2.2). A profundidade média dos litotipos carbonáticos, de acordo com os perfis de poços é 30,55m de profundidade.

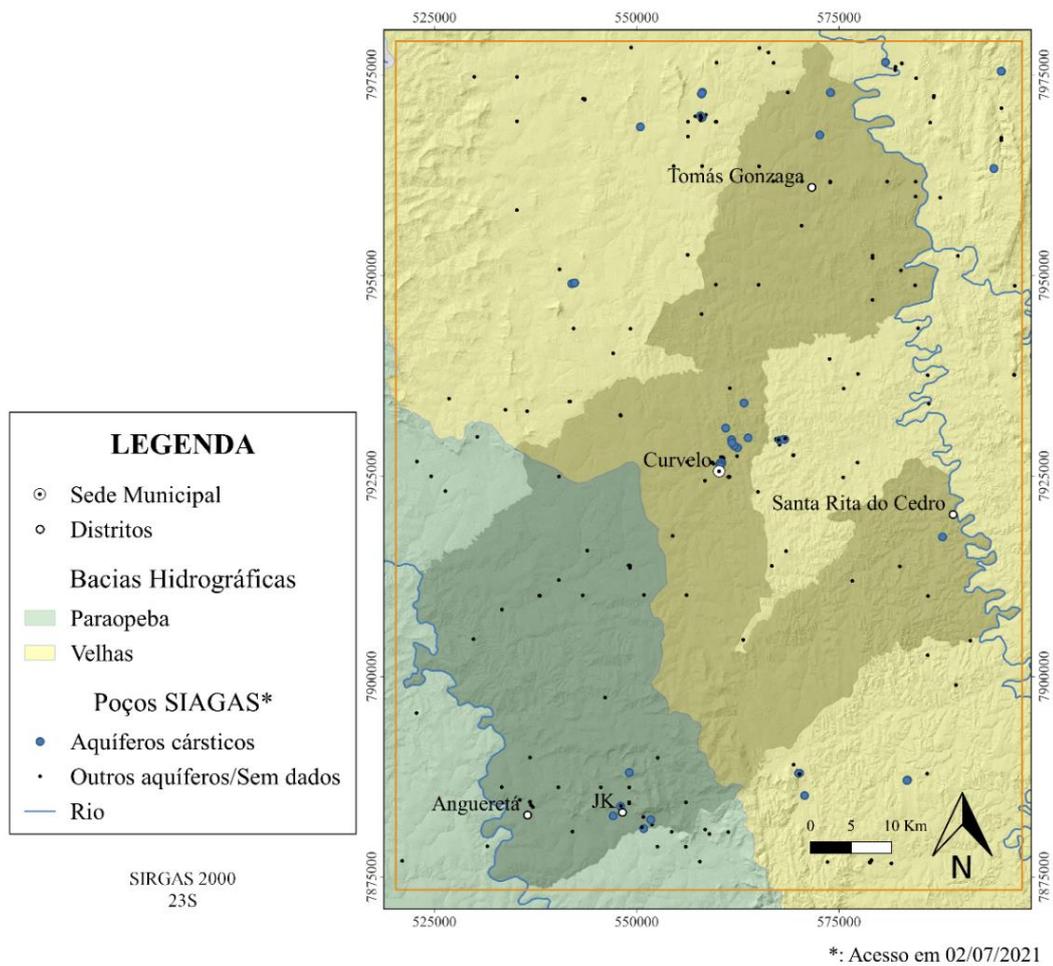


Figura 2.2 – Localização dos poços cadastrados no Sistema de Águas Subterrâneas para o Município de Curvelo.

2.3 CLIMA

A respeito de seu contexto climático, classifica-se o clima de Curvelo como tropical a subtropical de inverno seco, respectivamente *Aw* e *Cwa* (Beck *et al.* 2018). O clima tropical no município se dá por uma estação chuvosa no verão, de novembro a abril, e uma estação seca no inverno (Figura 2.3). O clima subtropical predomina na maior parte do município e é fruto dos efeitos da continentalidade típica do sertão. Este ambiente tropical com estações úmidas e grande disponibilidade hídrica é um dos principais fatores condicionantes para o desenvolvimento de feições de dissolução no Carste (Waltham *et al.* 2005).

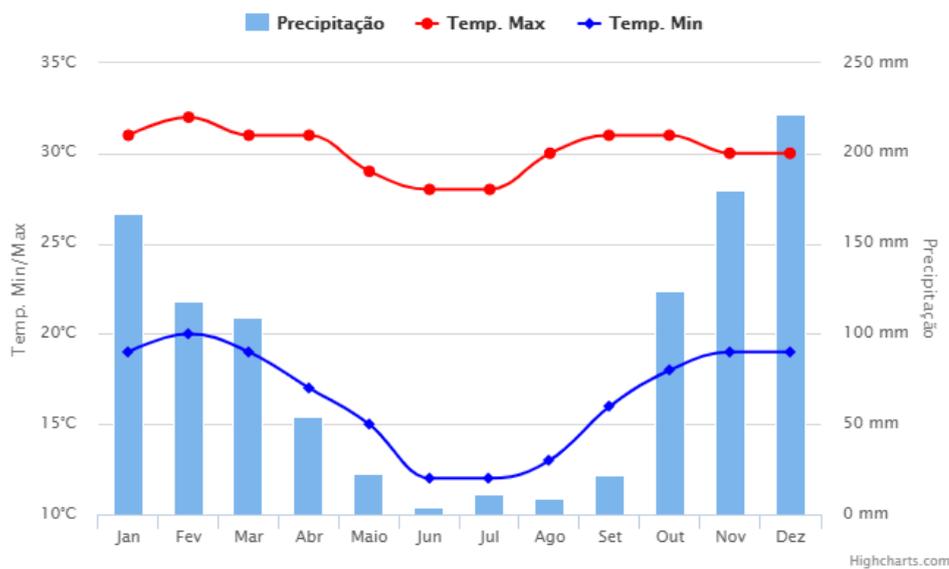


Figura 2.3 – Dados termopluiométricos do município de Curvelo. Extraído de Climatempo (2021)

2.4 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

A área de trabalho do presente estudo está inserida geologicamente sob o contexto da Bacia Sedimentar do São Francisco. Esta bacia se estende por grande parte do leste do Brasil, possui entre 200 a 350 Km de largura e 800 de extensão meridional, cobrindo uma área de aproximadamente 300.000 Km² dos estados de Minas Gerais, Bahia e Goiás (Almeida 1977). O embasamento dessa bacia é constituído por seu cráton homônimo, o Cráton do São Francisco (CSF), este limitado por cinturões orogênicos neoproterozoicos da orogenia Brasileira (Alkmim *et al.* 1996). A faixa Brasília limitando a oeste, a faixa Araçuai a leste e as faixas Rio Preto, Riacho do Pontal e Sergipana a parte norte do cráton (Figura 2.4).

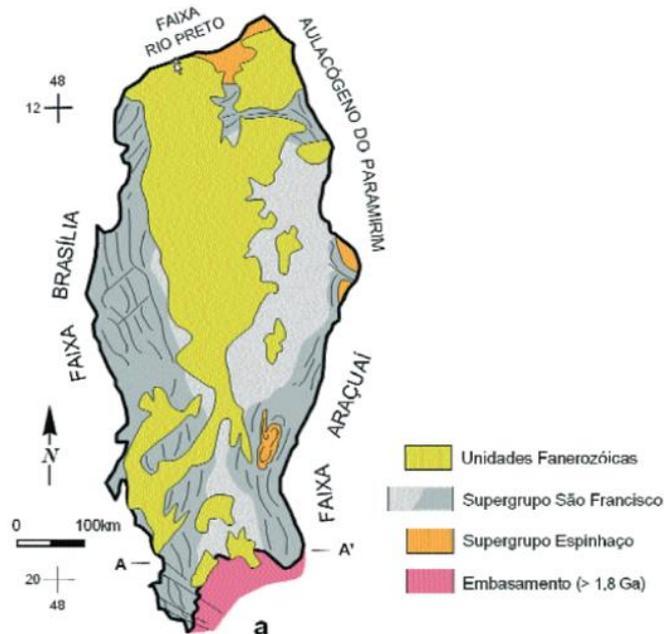


Figura 2.4 – A bacia do São Francisco e as faixas/cinturões de dobramentos delimitantes. Modificado de Alkmim & Martins-Neto (2001)

Zálan & Romeiro-Silva (2007) com base em sessões sísmicas de refração delimitam 3 superseqüências para o preenchimento da bacia sanfranciscana (Figura 2.5). A primeira, uma superseqüência rifte paleo a mesoproterozoica representada pelo Supergrupo Espinhaço e Grupo Araí. A segunda, uma superseqüência intracratônica neoproterozoica constituída pelas rochas do Grupo Macaúbas e Paranoá. A terceira, superseqüência intracratônica/antepaís composta pelos litotipos do Grupo Bambuí. Por último, coberturas delgadas e locais permo-carboníferas completam a sucessão estratigráfica da bacia.

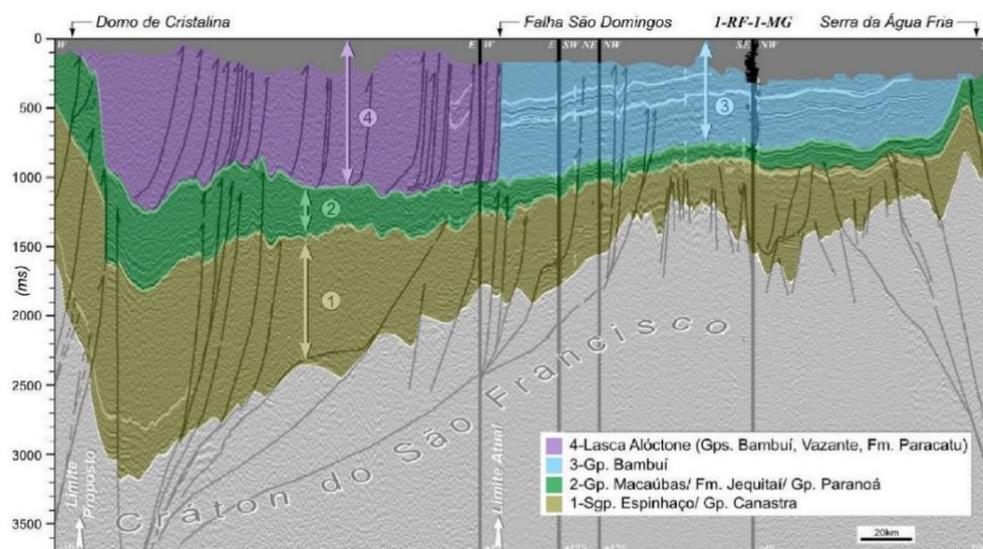


Figura 2.5 – Sessão sísmica regional da Bacia sedimentar do São Francisco, delimitando as superseqüências estratigráficas de preenchimento, estruturação e limites marginais propostos pelos autores. Modificado de Zalán & Romeiro-Silva (2007)

A superseqüência rifte relacionada ao Supergrupo Espinhaço, representa as rochas sedimentares ou metasedimentares basais da Bacia, as unidades dessa seqüência apresentam feições de deposição em um rifte de grandes dimensões com unidades presentes em subsuperfície em toda a extensão do cráton (Romeiro-Silva & Zalán 2005). Com base nos perfis sísmicos (Figura 2.1) é possível observar falhas normais com grandes rejeitos, tanto em níveis contíguos ao embasamento como em camadas internas aos estratos da unidade.

A superseqüência intracratônica composta pelos grupos Macaúbas e Paranoá registra sedimentação glacial acompanhada de vulcanismo bimodal com o posterior desenvolvimento de uma margem passiva. Seu limite inferior é marcado por discordância angular das unidades de topo erodidas da superseqüência rifte (Romeiro-Silva & Zalán 2005).

O Grupo Bambuí consiste nas unidades da superseqüência de topo do perfil sísmico na Figura 2.5. O caráter bacinal dessa superseqüência sedimentar ainda é alvo de discussões. Martins-Neto & Alkmim (2001) retomando propostas inicialmente elaboradas por Chang et al. (1988) e Barbosa et al. (1970), descrevem todo o grupo como correspondente a uma bacia de antepaís alongada em direção N-S desenvolvida em resposta a orogenia formadora da Faixa Brasília (limite ocidental do cráton). Romeiro-Silva & Zalán (2005) e Zalán & Romeiro-Silva (2007), entretanto, propõem um caráter intracratônico das porções basais do Grupo Bambuí e discordam da uma interpretação total de antearco, baseado na estruturação e espessuras das camadas nas sessões sísmicas.

As feições estruturais do Grupo Bambuí são mais presentes nas bordas da bacia são franciscana, sendo relacionadas à orogênese Brasileira em regiões vizinhas às faixas Araçuaí (Leste) e Brasília (Oeste). O limite com a faixa Araçuaí, próximo à área do estudo, é caracterizado por regiões falhadas e dobradas sem o envolvimento do embasamento, numa tectônica epidérmica ou *thinskinned*, com movimento paralelo aos planos de acamamento acomodando os esforços tectônicos (D'Arrigo 1995, D'Arrigo & Alkmim 1995, Alkmim & Martins Neto 2001, Pinho *et al.* 2006). Seguindo para o centro da bacia, as feições deformacionais são menos expressivas e feições sedimentares são preservadas, demonstrando a menor influência da deformação Brasileira no interior do cráton (Alkmim *et al.* 1989, Alkmim *et al.* 1993).

2.4.1 Grupo Bambuí

O Grupo Bambuí (Figura 2.6), cujas formações carbonáticas são alvo do presente estudo, é composto por uma sucessão de rochas marinhas carbonáticas e pelíticas, passando nas bordas da bacia e em sua unidade mais jovem para conglomerados e arenitos respectivamente (Dardenne 1978). É composto, da base para o topo pela Fm. Jequitaiá, Fm. Sete Lagoas, Fm. Serra de Santa Helena, Fm. Lagoa do Jacaré, Fm. Serra da Saudade e Fm. Três Marias. Esta sucessão compreende fácies siliciclásticas e carbonáticas depositadas em ambiente marinho epicontinental ao final do Neoproterozoico. Sua idade precisa ainda não é bem definida, Uhlein *et al.* (2019) atribuem à essa unidade, com base na descrição de fósseis guia de Warren *et al.* (2014), idade Ediacariana.

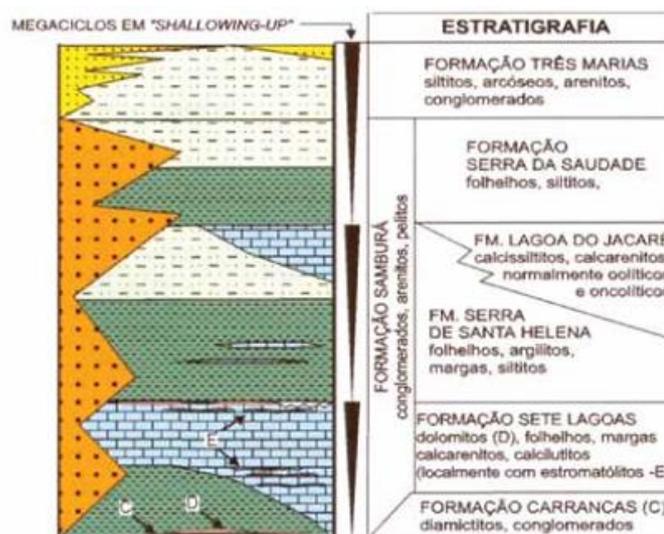


Figura 2.6 – Coluna estratigráfica do Grupo Bambuí demonstrando a relação entre suas principais unidades. Modificado de: Alkmim & Martins-Neto (2001)

A Fm. Jequitaiá/Carrancas, constitui depósito glaciogênico, sendo composta por diamictitos com seixos de quartzitos, calcários, dolomitos, *chert* gnaisses, micaxistos, granitos e rochas vulcânicas. Okubo *et al.* (2018) relacionam esta sucessão à glaciação Marinoana.

A Fm. Sete Lagoas define o início da sedimentação carbonática no Gp. Bambuí. Vieira *et al.* (2007) definem a idade de sua porção basal, a partir de anomalias de $\delta^{13}\text{C}$, como Marinoana. Se apresenta como calcários laminados, calcários e dolomitos estromatolíticos, doloarenitos e brechas dolomíticas depositados em ambientes de maré e plataformais (Lima *et al.* 2007).

A Fm. Serra de Santa Helena se apresenta predominantemente por rochas pelíticas, porém folhelhos, arenitos finos, ardósias e carbonatos são associados a ela. Seu contato em conformidade com a Fm. Sete Lagoas representa o início de um intervalo transgressivo (Uhlein *et al.* 2019, Dardene 1978) correspondendo a sedimentos marinhos depositados em plataforma siliciclástica distal (Vieira *et al.* 2007).

A Fm. Lagoa do Jacaré se sobrepõe concordantemente a Fm. Serra de Santa Helena. Essa unidade, segundo Dardene (1978), é composta por uma alternância de calcários oolíticos e pisolíticos, cinza-escuros, fétidos, rico em matéria orgânica, siltitos e margas acinzentadas. Os carbonatos relacionados à essa formação, em contraposição aos da Fm. Sete Lagoas, foram depositados em ambientes marinhos abertos, sendo evidenciado por feições de retrabalhamento sedimentar (Uhlein *et al.* 2019).

A Fm. Serra da Saudade é representada por folhelhos e argilitos cinzentos e verdes (Dardenne, 1978) intercalados por carbonatos retrabalhados, ritimito areno-pelíticos verdes (*verdetes*) ricos em glauconita, arenitos finos com estruturas *hummocky* e ritimitos fosfáticos (Lima *et al.* 2007).

Compondo o topo do Grupo Bambuí, a Fm. Três Marias é composta por arcóseos e siltitos verdes a cinza-esverdeados, assentados sobre a Fm. Serra da Saudade em contato gradacional (Dardenne 1981). Chiavegatto (1992) atribui à natureza dos sedimentos da formação um regime plataformal raso sedimentado sob intensa influência de ondas de tempestade.

2.5 GEOLOGIA LOCAL

Para a elaboração do presente trabalho, foram utilizados os mapeamentos geológicos realizados pela CPRM em parceria com a UFMG (Universidade Federal de Minas Gerais) no Programa Geologia do Brasil (PGB), das folhas Andrequicé (SE-230-Z-A-I), Corinto (SE-23-Z-A-II), Morro da Garça (SE-23-Z-A-IV), Curvelo (SE-23-Z-A-V), Pompéu (SE-23-Z-C-1) e Sete Lagoas (SE-23-Z-C-II). O PGB é responsável por mapeamentos geológicos básicos, em escala 1:100.000, numa parceria entre a CPRM e universidades públicas brasileiras.

Foram selecionados e adquiridos dados dos mapeamentos que abrangiam toda a área municipal de Curvelo. A partir dos dados SIG, foram discriminados os polígonos exteriores à área de estudo

conforme demonstrado na Figura 2.7. Foram descritos na área seis unidades, duas de caráter detrítico/laterítico/eluvial e outras quatro unidades pertencentes ao Supergrupo São Francisco.

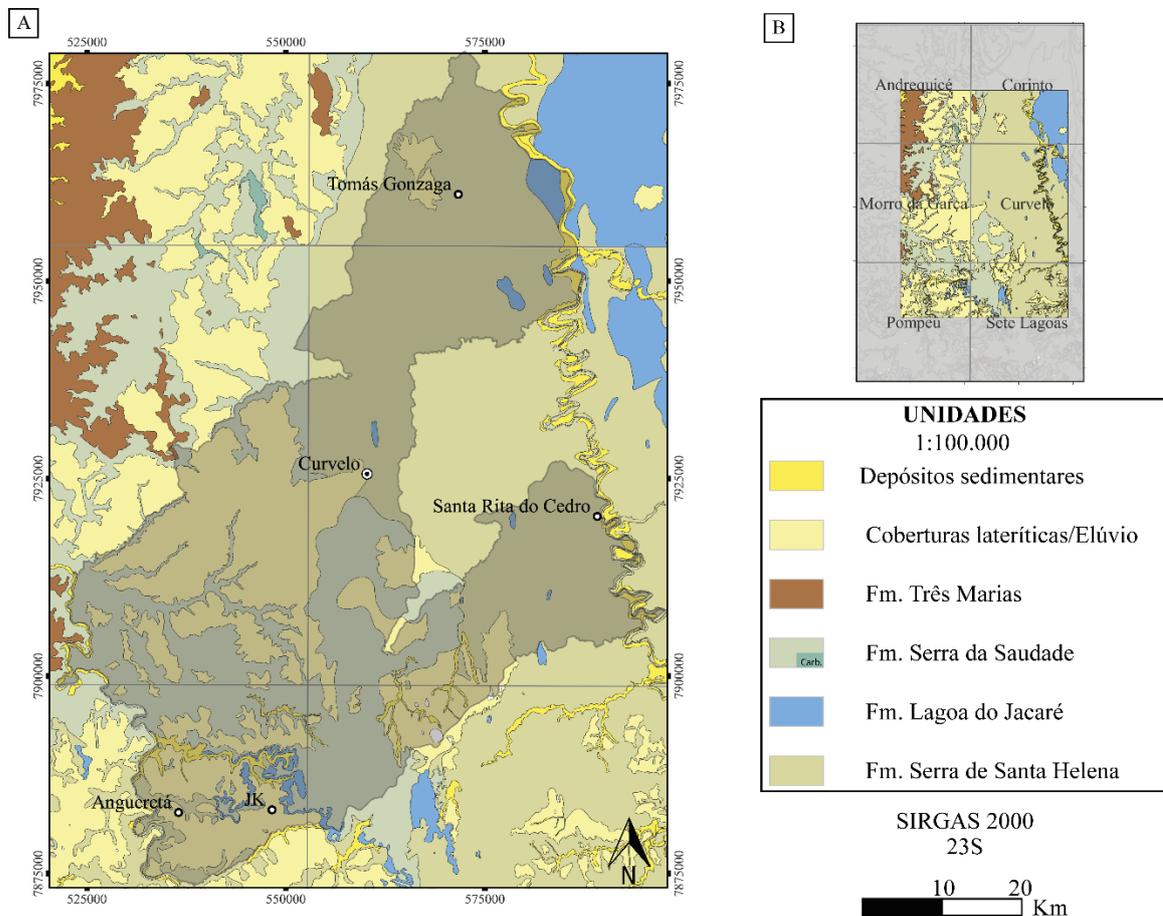


Figura 2.7 – A) Mapa litológico bruto do município de Curvelo (destacado em cinza) e adjacências, B) articulação das folhas.

A unidade basal e mais representativa da região é Formação Serra de Santa Helena e ocorre predominantemente como sequências metapelíticas de intercalações de metassiltitos e metaargilitos, apresentando localmente lentes de metaarenitos finos e ardósias. Nessa unidade são vistas estruturas de estratificação plano paralelas e xistosidade ora oblíquas e ora paralelas ao acamamento (Costa *et al.* 2012).

A Formação Lagoa do Jacaré está presente majoritariamente na porção Nordeste e sul da folha, muitas vezes como “ilhas” topograficamente destacadas no relevo. São relacionados a essa unidade, rochas calcárias de em diferentes texturas. Podendo se apresentar como metacalcários acinzentados, calcários micríticos, carbonatos espásticos (em veios) ou *grainstones* oolíticos e pequenas intercalações

metapelíticas ou margosas. As rochas da unidade apresentam laminações e estratificações plano-paralelas até cruzadas acanaladas (Romano *et al.* 2014).

Os sedimentos da Formação Serra da Saudade afloram com maior representatividade na parte oeste da área de estudo. Predominam nesses domínios argilitos e siltitos micáceos, que variam entre tons amarelados e rosados, quando alterados, e cinza-esverdeados, quando frescos. Associado a esse domínio foram descritas ocorrências pontuais de folhelhos carbonosos intercalados a argilitos laminados, além de um subdomínio carbonático com menos de 50 m de espessura representado por calcarenitos finos e calcilitos acinzentados quando frescos (Reis *et al.* 2014).

As unidades litológicas atribuídas a Formação Três Marias afloram quase somente na porção noroeste da área de estudo especialmente em regiões topograficamente mais elevadas. O contato entre essa formação e a Formação Serra da Saudade, imediatamente sotoposta, apresenta caráter gradacional. A formação é predominantemente composta por arenitos finos, siltitos micáceos, arenitos arcoseanos/arcóseos e ritmito areno-pelíticos. Exibem estratificações plano-paralelas, cruzadas, cruzadas tangenciais e *hummocky* (Reis *et al.* 2014).

Coberturas cenozoicas recobrem indistintamente as litologias pré-cambrianas na área de estudo. Distingue-se dois principais domínios para essas coberturas. Coberturas eluvionares e detrito-lateríticas que afloram ao longo das baixadas e regiões de relevo mais arrasado, predominando sedimentos areno-argilosos, latossolos avermelhados e localmente associados a cascalheiras coluvionares. Por último os depósitos sedimentares aluvionares localizados ao longo da calha dos rios Paraopeba e das Velhas, representados por sucessões arenosas pouco espessas e, por vezes, estratificadas (Reis *et al.* 2014).

CAPÍTULO 3

CARSTE

O presente capítulo visa discutir aspectos teóricos acerca do carste, começando por sua gênese e classificações particulares, passando por suas condicionantes evolutivas, apresentando as peculiaridades que a ocupação humana deve levar em conta ao avançar sobre esses terrenos. Por último, o capítulo apresenta características e particularidades a respeito do carste de Curvelo.

3.1 DEFINIÇÃO

Denomina-se de carste uma classe de relevo e sistema natural, cuja evolução se dá a partir da dissolução de um substrato de alta solubilidade e presença de uma porosidade secundária bem desenvolvida, originando uma eficiente rede de drenagens subterrâneas, cavidades e condutos (porosidade terciária). Etimologicamente, o termo é originário da região balcânica dinárica onde a palavra *kras* significa chão rochoso não favorável à agropecuária (Ford & Williams 2007). A expressão “Carste” surge a partir do aportuguesamento da derivação alemã *karst*.

Terrenos cársticos são formados, tipicamente, em regiões de substrato carbonático. Ao longo do tempo, a rocha é sujeitada a lentos processos de dissolução causados pela combinação; de uma alta solubilidade da rocha e da presença de discontinuidades na mesma. Tais terrenos e feições, também se desenvolvem em outras rochas de alta solubilidade, como gipsos e evaporitos, entretanto, rochas carbonáticas como calcários e dolomitos ocupam cerca de 20% da área emersa sem gelo do planeta Terra (Figura 3.1), sendo por tanto, alvos mais intensos de estudos (Bogli 1980, Ford & Williams 2007).

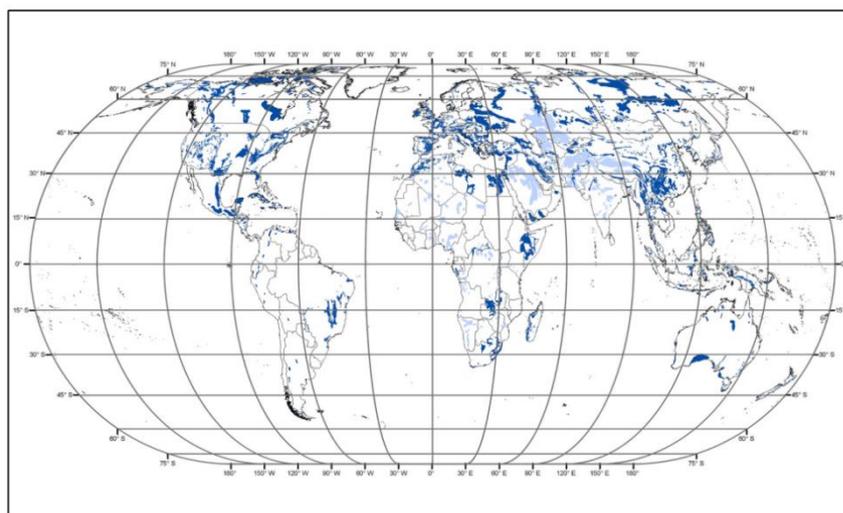


Figura 3.1 – Planisfério destacando a distribuição das regiões cársticas mundiais. Extraído Ford & Williams (2007).

3.1.1 Rochas carbonáticas

Rochas carbonáticas são definidas por rochas de composição com mais de 50% de minerais carbonáticos como a calcita (CaCO_3) e/ou dolomita ($\text{MgCa}(\text{CO}_3)_2$). Numa classificação simplificada, pode-se considerar que calcários são rochas com teores de calcita maiores que 50% e dolomitos como rochas com mais de 50% de dolomita. As frações não carbonáticas dessas rochas são geralmente argilominerais e sílica criptocristalina (*chert*), esses materiais formam o solo residual após a meteorização dos calcários e dolomitos. Calcários e dolomitos podem ser formados em diferentes ambientes sedimentares, sendo majoritariamente relacionados a depósitos marinhos de água rasa sedimentados a partir de precipitados químicos e biogênicos (Suguo 2009). Sua formação é limitada aos 1500 m superiores dos oceanos, devido a superfície de compensação da calcita. Os mecanismos de controle das taxas de deposição são; a temperatura, a concentração iônica (salinidade) e a presença de organismos bioconstrutores (Brookfield 2004).

3.1.2 Carste no Brasil

Terrenos cársticos estão presentes em todas as regiões do Brasil. Auler *et al.* (2001) estima que cerca de 190.000 km do território brasileiro se encontra inserido nessas áreas (Figura 3.2). Tais terrenos, se desenvolvem em áreas cratônicas sob rochas carbonáticas antigas do proterozoico superior ao cambriano inferior (Karmann 1994, Auler & Farrant 2006). A região do Gr. Bambuí se destaca por ser a mais extensa região de exposição de rochas carbonáticas do Brasil, aflorando nos estados de Minas Gerais, Bahia e Goiás e exibindo feições cársticas exemplares, como grandes cavernas e dolinas. O carste se desenvolve em duas formações geológicas distintas desse grupo, são elas a Formação Sete Lagoas e Formação Lagoa do Jacaré.

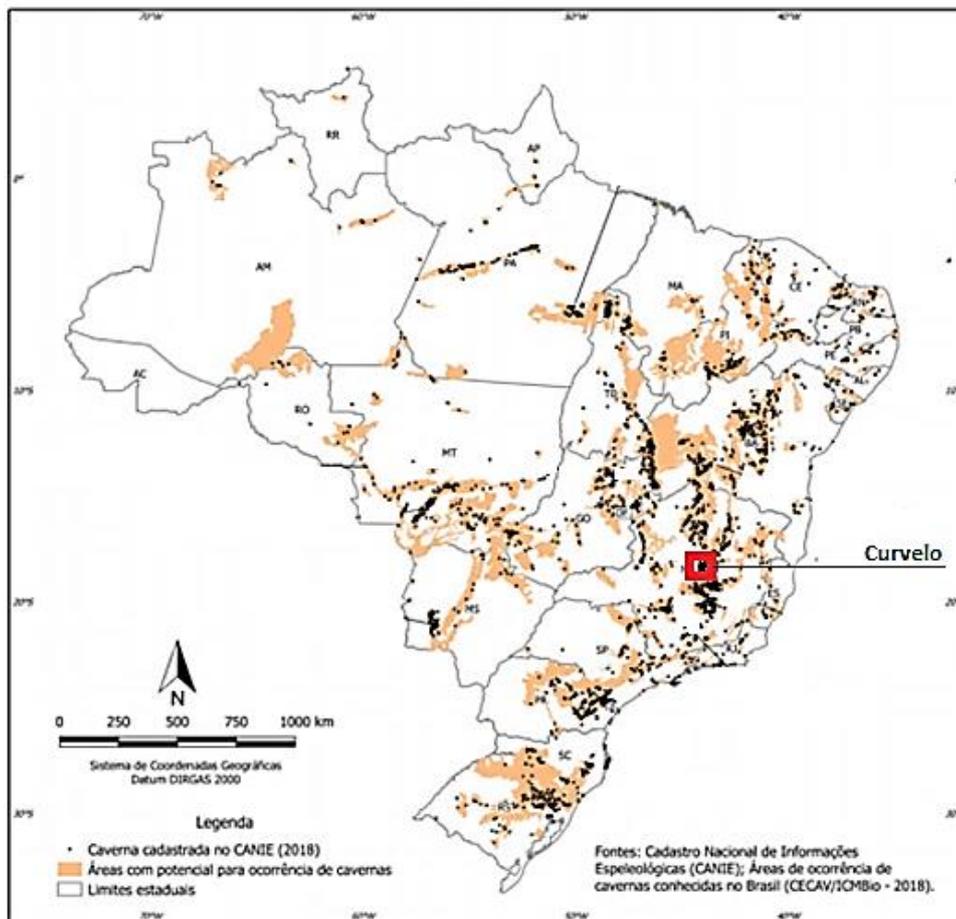


Figura 3.2 – Áreas potenciais e cavernas cadastradas no CANIE (Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas) até 2018. Modificado de CECAV/ICMBio (2018)

3.2 DISSOLUÇÃO

O relevo cárstico é comumente considerado resultado de processos de dissolução de uma rocha, de alta solubilidade com presença de descontinuidades. A dissolução ocorre devido ao caráter ácido da água, adquirido a partir da hidratação do CO₂ atmosférico ou pelo contato com matéria orgânica presente nos solos. As reações químicas de: (1) Acidificação da água pelo gás carbônico presente no ar e no solo; (2.1 e 2.2) Dissolução das rochas carbonáticas, calcário e calcário dolomítico respectivamente e (3) precipitação de depósitos químicos; obedecem a estequiometria abaixo (Ford & Williams 2007):



3.2.1 Papel das discontinuidades

Um *aquífero* é definido como uma rocha capaz de armazenar e transmitir água (White 2012). A existência de vazios (poros) na rocha permite que a água seja armazenada, sendo a capacidade de armazenamento função da *porosidade*. O grau de conexão entre esses poros é chamado de *permeabilidade* e representa a capacidade da rocha em transmitir o fluxo de água. Aquíferos cársticos são definidos por um *modelo triplo de porosidade*, ou seja, apresentam uma *porosidade primária* diagenética, uma *porosidade secundária* gerada ao longo de discontinuidades em planos de fratura, falhas e acamamento e a *porosidade terciária* gerada a partir da dissolução das rochas aquífero.

A maior permeabilidade gerada a partir da porosidade secundária torna esses planos de discontinuidade alvos preferenciais do ataque dissolutivo que os alargam e geram condutos com o fluxo bem similar ao de canos (Figura 3.3). O papel hidrogeológico e espeleogenético exercido por falhas e fraturas torna o histórico tectônico das rochas solúveis um relevante fator na determinação da direção de fluxos, condutos, cavernas e no alinhamento de dolinas em terrenos cársticos (Ford & Williams 2007, Waltham *et al.* 2005).

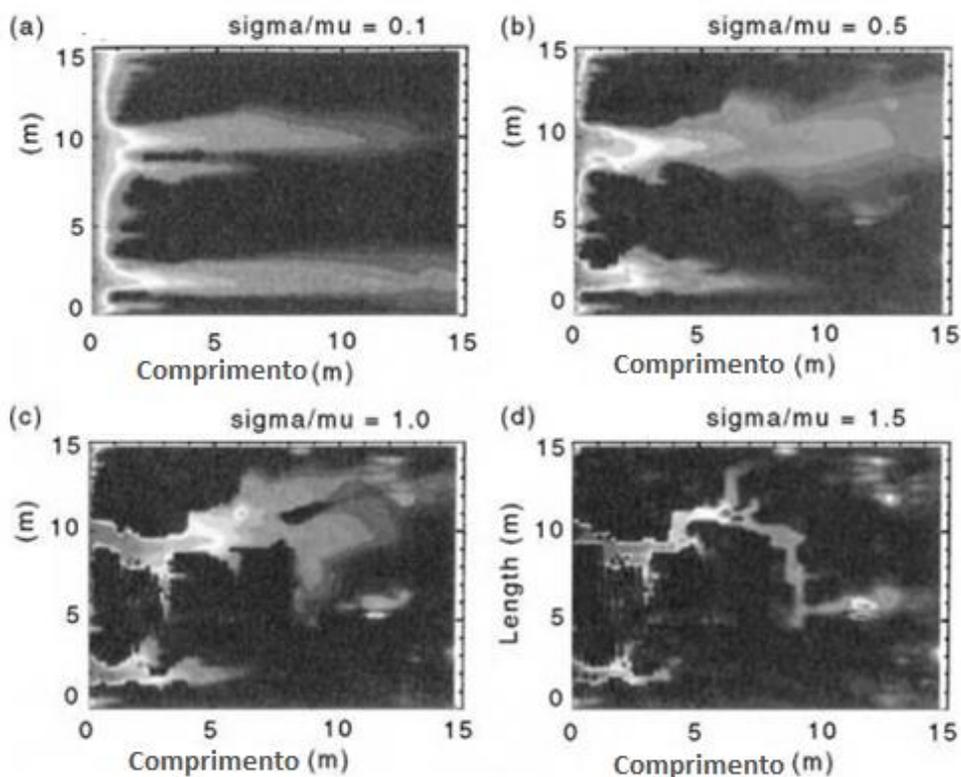


Figura 3.3 – Modelo computacional de alargamento de discontinuidades em terrenos cársticos. Os modelos (a) e (b) representando a dissolução ao longo de juntas e fraturas e (c) e (d) a dissolução ao longo de planos de acamamento. Modificado de Ford & Williams (2007)

3.2.2 Taxas de denudação e clima

A taxa de denudação do relevo exibe uma correlação positiva direta com a temperatura e a precipitação de água nesses ambientes (Quadro 3.1). A agressividade da água meteórica é relacionada a concentração de CO₂ atmosférico dissolvido e à temperatura, uma vez que essa é o agente catalisador da atividade biológica no solo. Dessa forma, pode-se dizer que a evolução do carste é mais acelerada em regiões temperadas e tropicais úmidas devido à grande disponibilidade de dióxido de carbono no solo e alta precipitação (Waltham *et al.* 2005).

Quadro 3.1 – Influência do clima na evolução de terrenos cársticos. Modificado de Waltham *et al.* (2005)

Clima	Concentração de CO ₂ (g) no solo (%)	Temperatura média (°C)	CaCO ₃ dissolvido (ppm)	Precipitação (mm/ano)	Denudação (mm/ka)
Carste ártico	0,1	0	50	100	10
Carste temperado	1	10	200	1500	30
Carste tropical úmido	10	30	300	2500	60
Carste tropical muito úmido	10	30	300	5000	120

Nota-se que a dissolução do calcário apresenta uma velocidade bastante lenta, com taxas de denudação centimétricas numa escala de milhares de anos. Auler (1994) estimou para o carste de duas cidades mineiras localizada sobre o grupo Bambuí, taxas de denudação que variam entre 70-150 mm. ka⁻¹. A escala temporal desse fenômeno permite afirmar que a formação de uma cavidade, relevante em tamanho, não consegue ser criada naturalmente durante a vida útil de uma edificação ou estrutura (Waltham *et al.* 2005).

3.2.3 Ambientes do carste

A subdivisão dos ambientes cársticos é definida na literatura, tanto pelas suas características morfológicas como pela natureza e gênese dos processos de carstificação ou espeleogênese. A classificação aqui tomada, leva em conta os conceitos de *exocarste* como a região superficial do relevo cujas feições geomorfológicas típicas se desenvolvem; o conceito de *epicarste* como a zona subcutânea ao relevo, coberta ou não por material insolúvel que contém uma rede de fissura alargada por processos espeleogenéticos e ativamente influenciado por águas meteóricas; e o domínio do carste *hipogênico* cuja espeleogênese é provocada por fluxos de fluídos ascendentes de águas juvenis ou conatas (Figura 3.5) (Ford & Williams 2007, Piló 2000). A zona do carste hipogênico, não será tratada no presente trabalho haja vista o caráter profundo da gênese dos seus fenômenos e o caráter superficial do fenômeno estudado.

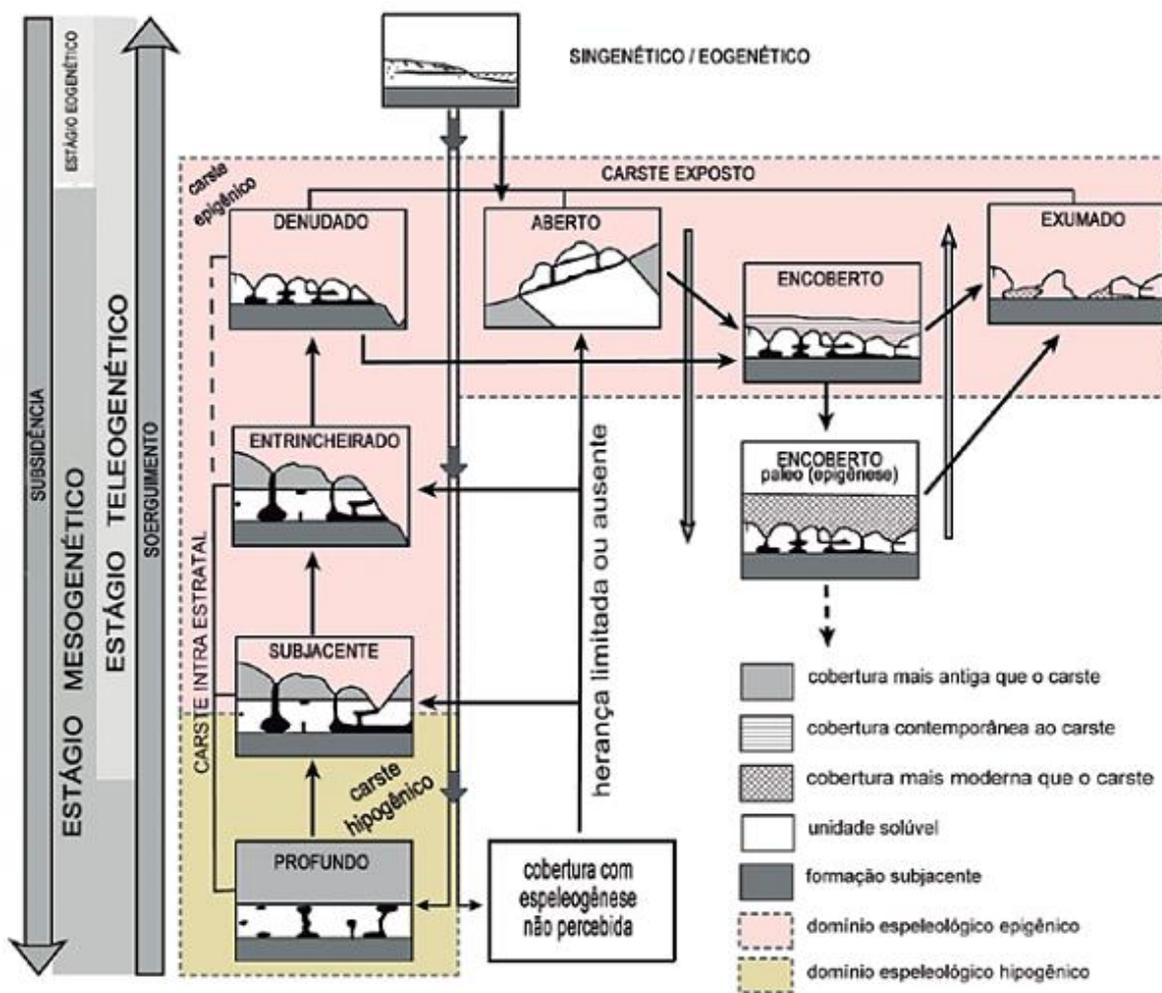


Figura 3.4 – Evolução dos tipos de carste a partir dos domínios da espeleogênese epigênica e hipogênica. Modificado de Klimchouk & Ford (2000)

3.2.3.1 Exocarste

O exocarste consiste num conceito geomorfológico para subdividir a zona superficial do relevo onde suas feições de dissolução se desenvolvem (Piló 2000). Tais formas embora descrevam o mesmo produto, podem apresentar diferentes nomenclaturas dependendo da região e escola seguida pelo autor do estudo. Por exemplo, o termo amplamente utilizado pela academia para descrever as *dolinas*, cuja proveniência eslava significa “pequeno vale”, na literatura norte americana é comumente denominado como *sinkhole* (e.g. Waltham *et al.* 2005), que numa tradução livre significa “cavidade de afundamento”.

Dentre as feições geomorfológicas do carste (Figura 3.5), destacam-se os *lapiás* (*karrens*) que são canais formado a partir da dissolução superficial das rochas; *sumidouros*, que consistem em pontos onde a água da drenagem superficial adentra diretamente ao aquífero na chamada recarga pontual; o *polje*, definido por extensas depressões de fundo plano fechadas por escarpas íngremes e as *dolinas*,

caracterizadas como depressões circulares ou ovais cujo diâmetro é maior que sua profundidade (Bogli 1980, Ford & Williams 2007).

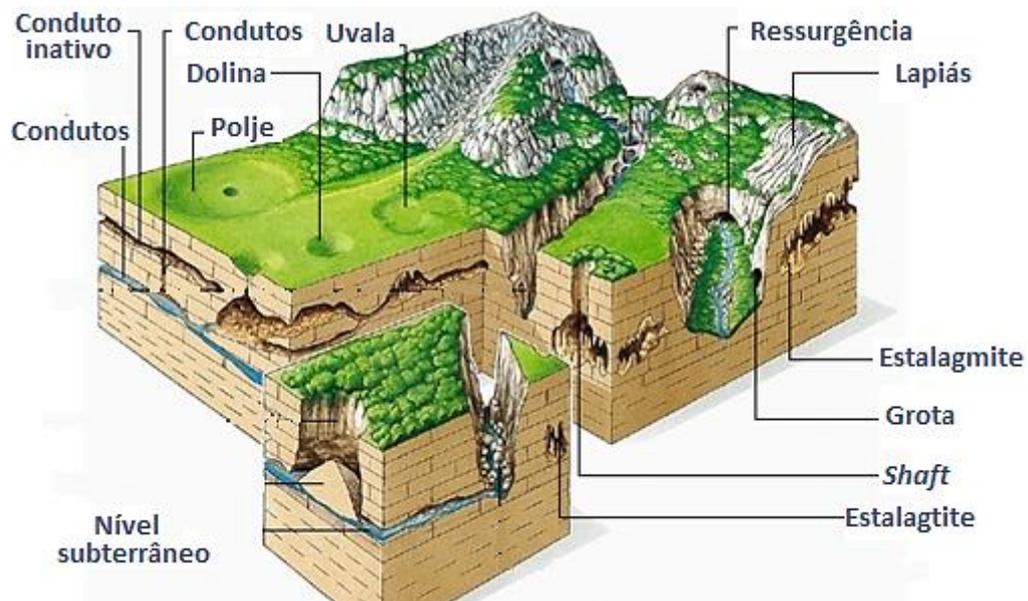


Figura 3.5 – Feições do relevo cárstico. Modificado de Larrouse (2019).

Dolinas são consideradas feições diagnosticas de terrenos cársticos (Waltham 2005, Ford & Williams 2007) e são classificadas de acordo com sua origem. Os processos desencadeados para a formação de uma dolina, como colapsos, compactações e subsidências, constituem importantes problemas associados a ocupação de terrenos cársticos e, por serem alvo do presente trabalho, serão por menorizados em tópico específico.

3.2.3.2 *Epicarste*

O termo epicarste consiste na generalização do conceito de *aquífero epicárstico* definido por Magin (1973 *apud* Bakalowicz 2012). Para o autor, esse aquífero localiza-se na zona superficial do carste e armazena parcialmente a água infiltrada. O epicarste consiste na região subcutânea (Williams 1983) do carste, onde o fluxo meteórico promove a dissolução de juntas e fraturas verticais, desenvolvendo uma camada superior de porosidade terciária desenvolvida. A base do epicarste consiste em um nível que funciona como um aquífero e delimita um nível d'água local (Figura 3.4). Ford & Williams (2007) apontam que cerca de 70% da denudação em calcários é exercida nos primeiros 10m de profundidade, devido à proximidade com as fontes de dióxido de carbono (solo e atmosfera), característica que pode explicar a origem desse nível local de saturação.

Alguns autores (Williams 1983, Klimchouk 2004) consideram as dolinas como parte do epicarste, uma vez que essas feições desempenham um relevante papel no escoamento da água superficial para o aquífero. Klimchouk (2004) inclusive considera a dolina e as outras feições superficiais dos

terrenos cársticos a representação em superfície do epicarste, na denominada *espeleogênese epigênica* (Figura 3.5). Bakalowicz (2005) e Jones *et al.* (2004) por outro lado, acreditam que a definição dessa zona deve ser definida não por sua morfologia, mas por seus processos típicos e o seu papel hidrogeológico no armazenamento e transmissão do fluxo, por isso, as dolinas são interpretadas em Bakalowicz (2012), como feições superficiais geradas a partir da drenagem do armazenamento do epicarste por condutos verticais num fluxo concentrado sob as feições (Figura 3.6).

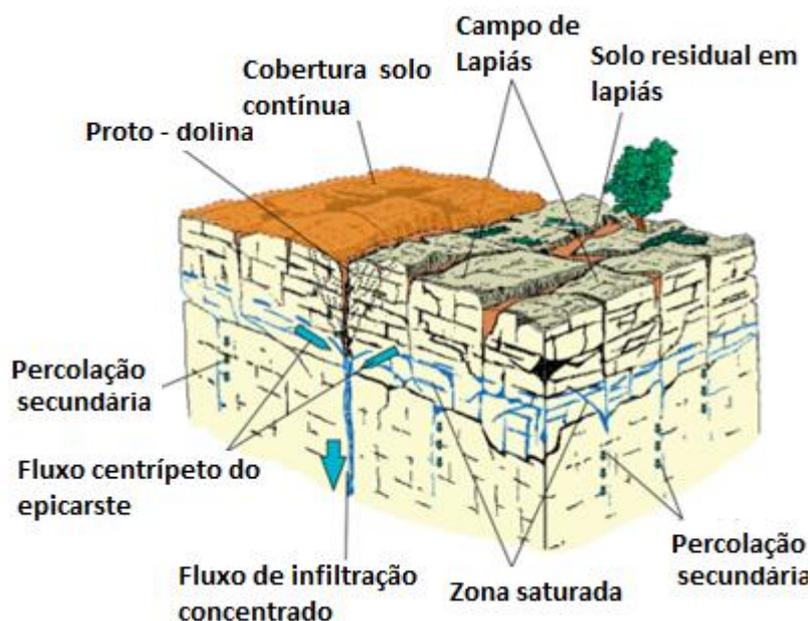


Figura 3.6 – Epicarste representado em duas condições. A esquerda com a presença de cobertura de solo e a direita sob um campo de lapiás. Modificado de Bakalowicz (2012)

3.3 DOLINAS

Dolinas, também presente na literatura norte americana como *sinkholes*, caracteriza uma depressão no relevo com drenagem centrípeta interna e representa uma das principais feições diagnósticas de relevos cársticos (Ford & Williams 2007). O termo é derivado do idioma eslavo e é amplamente usado por geocientistas europeus e brasileiros (e.g. Bogli 1980, Piló 2000). Em síntese, a feição se desenvolve a partir da dissolução de rochas carbonáticas ou evaporíticas.

Existem uma grande quantidade de classificações para as dolinas na literatura (e.g. Waltham *et al.* 2005, Beck 2005, Williams 2004, Bögli 1980). Gutierrez *et al.* (2008) realizam a integração entre as classificações de Waltham *et al.* (*op cit.*) e Beck (*op cit.*) subdividindo dolinas em dois grupos. As *dolinas de dissolução*, formadas a partir da exposição aérea de rochas solúveis governadas por fluxos centrípetos, no epicarste, criando zonas focais de dissolução (Ford & Williams 2007). *Dolinas de*

subsidência, por outro lado, são formadas a partir da dissolução subsuperficial e posterior deslocamento vertical da cobertura.

Dolinas de dissolução são formadas em áreas onde há a exposição superficial de rochas solúveis. Fluxos de água superficial nesses ambientes, tendem a se concentrar em pontos de maior infiltração, geralmente juntas de dissolução, e ser escoado para regiões inferiores, gerando as depressões da superfície (Figura 3.7). Devido a velocidade lenta do processo de dissolução, esse tipo de dolina não caracteriza zonas de risco geológico relevante, porém, representam regiões particularmente sensíveis ambientalmente, uma vez que são zonas de recarga direta ao aquífero do epicarste (Klimchouk 1995).

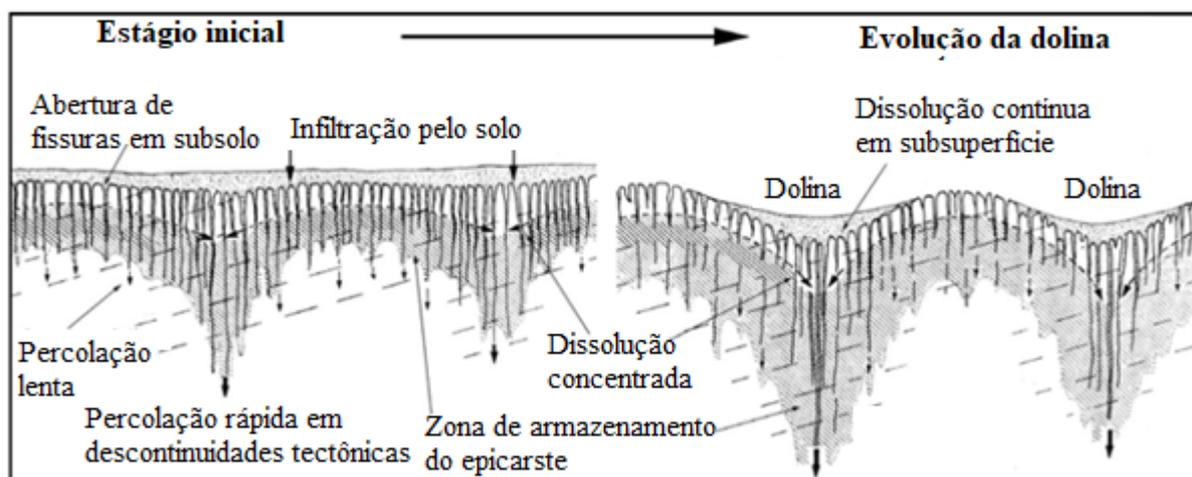


Figura 3.7 – Evolução e desenvolvimento de uma dolina de dissolução a partir de um conduto preferencial. Modificado de Williams (1983 *apud* Williams 2008)

Se na região o carste se encontra recoberto por uma acumulação relevante de solo ou de rochas sotopostas a essas formações, dolinas de subsidência podem ser formadas a partir da instabilização de cavidades subjacentes. O processo de formação dessa feição representa o risco geológico mais comum associados a terrenos cársticos (Waltham *et al.* 2015, Parise 2015) e pela sua relevância, são classificadas em dois critérios materiais e genéticos (Figura 3.8). O primeiro, define o material afetado pela deflagração da subsidência (solo, rocha insolúvel ou rocha solúvel) e o segundo descreve o processo desencadeado dado o caráter reológico do material (colapso, sufusão ou acomodação) (Gutierrez *et al.* 2014).

Os materiais de cobertura podem se apresentar como um solo inconsolidado (residual ou alogênico), como uma litologia insolúvel ou pela própria rocha solúvel. Gutierrez *et al.* (2008) classificam essas coberturas como respectivamente; *cover*, *caprock* e *bedrock*. Quanto aos processos responsáveis pela subsidência, o autor denomina como *colapso* a subsidência rúptil de solos e/ou rocha que produzem planos bem definidos de rompimento; *sufusão* é definido pela migração vertical progressiva dos solos de cobertura por meio de condutos subterrâneos; a *acomodação* consiste na flexão

dúctil do material de cobertura. Cabe destacar que tais processos não são excludentes entre si, *dolinas complexas* podem ser formadas a partir da combinação de mais de um dos processos descritos anteriormente.

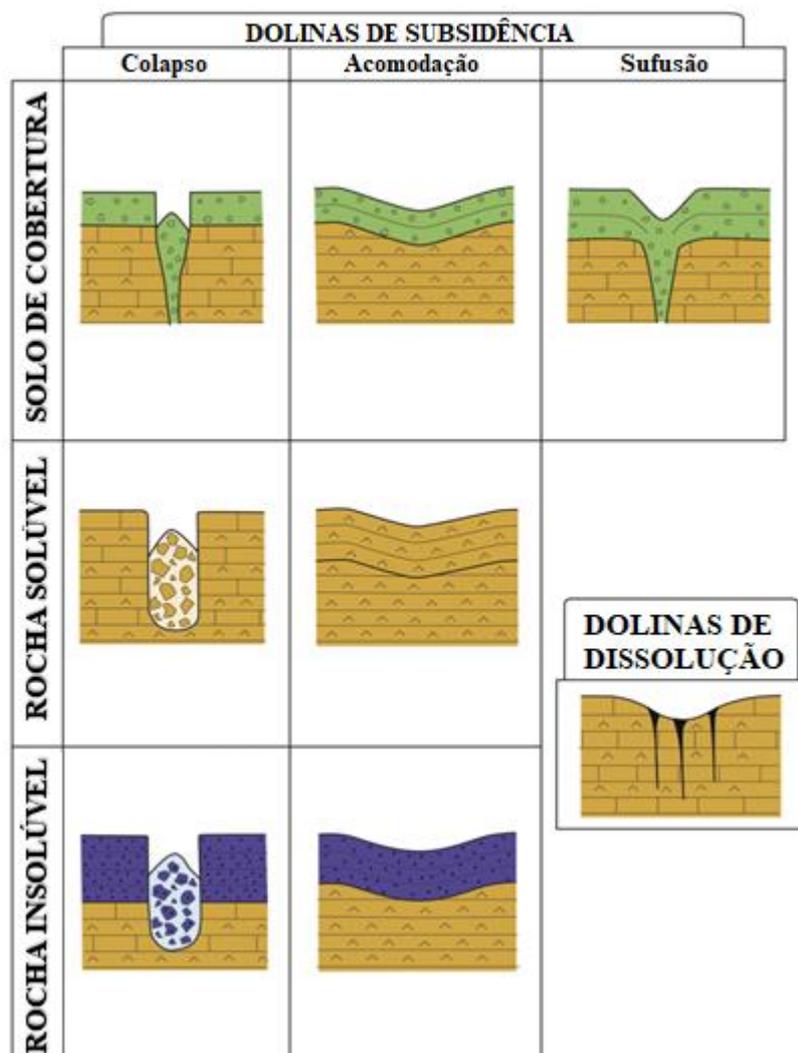


Figura 3.8 – Classificação genética de dolinas. Modificado de Gutiérrez *et al.* (2008)

3.3.1 Colapsos

Colapsos ocorrem em terrenos cársticos quando a cobertura se comporta de maneira quebradiça (rúptil) e a erosão química subsuperficial gera cavidades arqueadas que migram em sentido ascendente a partir de sucessivos eventos de abatimento da cobertura (Waltham *et al.* 2005) (Figura 3.9).

3.3.1.1 Colapso em carste exposto

A estabilidade de uma cavidade em calcários é função direta de seu volume e da integridade estrutural do seu teto. A posição, formato e tamanho das cavidades são guiadas por discontinuidades

estruturais e estratigráficas da rocha. Cavidades de grandes proporções, ou cavernas, estão relacionadas a climas tropicais, por tanto, pode-se dizer que a incidência de eventos de colapso é relacionada ao clima (Waltham *et al.* 2005).

A distribuição da tensão gravitacional/litostática gerada ao redor de uma cavidade cria uma zona compressional arqueada sobre o teto da cavidade (Bögli 1980, Waltham 2005). Essa zona de tensão controla o desenvolvimento de planos de fratura em formato de cúpula, gerando tetos arqueados relativamente estáveis (Gutiérrez *et al.* 2014). A progressão vertical desses planos de fratura cria feições denominadas chaminés de fraturas ou *shaft* (Klimchouk & Andrejchuk 2002) e tem como produto terminal as dolinas de colapso. Tais feições por serem geradas em rocha sólida, possuem limites laterais bem íngremes.

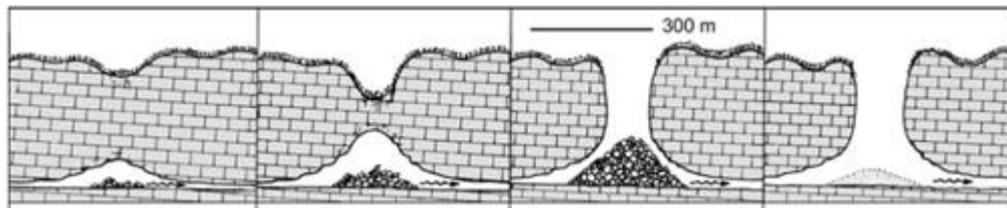


Figura 3.9 – Perfis demonstrando a evolução em quatro estágios de uma dolina de colapso em calcário em Papua Nova Guiné. Modificado de Maire (1981 *apud* Waltham *et al.* 2005)

3.3.1.2 Colapso em carste subjacente

Em regiões de cobertura insolúveis, a ocorrência de dolinas é totalmente influenciada pela dissolução do carste interestratal subjacente. A dissolução, nesse caso, é condicionada a regiões de contato entre a cobertura e a rocha cárstica em zonas de maior permeabilidade. A formação de cavidades, subjacentes a cobertura não cárstica gera uma zona de instabilidade subterrânea de erosão vertical interna. A migração vertical dessa erosão gera uma feição similar a uma chaminé, num processo denominado *pipping* (Jennings 1971) (Figura 3.10). Ao fim, com o colapso das cavidades momentâneas sustentadas se formam as dolinas de colapso (Beck 2012).

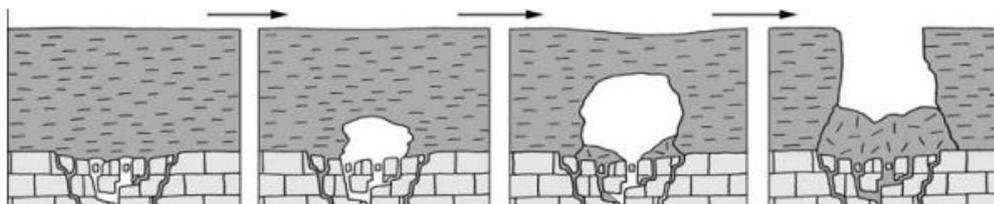


Figura 3.10 – Formação de dolinas de colapso em coberturas coesas sobre carste subjacente. Modificado de: Waltham *et al.* (2005)

3.3.2 Sufusão

Dolinas de sufusão (Figura 3.11) descrevem feições geradas onde a cobertura se comporta como um material inconsolidado e dúctil (e.g. Jancin & Clark 1993). Nesses domínios, o fluxo de água em condutos cársticos induz um comportamento não-newtoniano das partículas do solo ali presente, e com uma desestabilização do sistema migra-as gravitacionalmente para níveis inferiores. Esse processo acontece de maneira gradual sem o desenvolvimento de planos de fratura significativos e produz uma dolina em formato de funil com alguns metros de diâmetro (Gutiérrez *et al.* 2014).

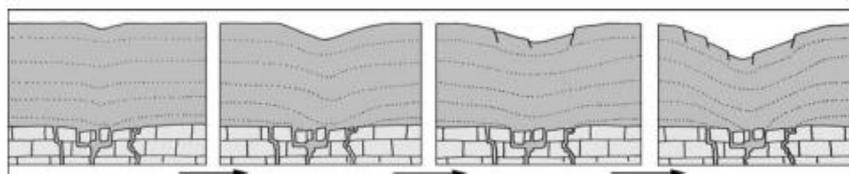


Figura 3.11 – Formação de dolinas de sufusão em sedimentos inconsolidados. Modificado de Waltham *et al.* (2005)

3.3.3 Acomodação

Dolinas de acomodação, são causadas pelo rebaixamento gradual da cobertura causado pela dissolução diferencial e produz pequenas depressões diferenciais no relevo. O caráter dúctil neste caso é relacionado à rocha solúvel e ocorre predominantemente onde essa tem origem evaporítica. Tal processo não requer a formação de cavidades, são tipicamente superficiais e podem apresentar extensões de centenas de metros e não representa risco geológico significativo (Gutiérrez *et al.* 2014).

3.4 INFLUÊNCIA HUMANA EM SUBSIDÊNCIAS CÁRSTICAS

A maioria das dolinas presentes no mundo são feições herdadas de processos de dissolução que ocorrerem ao longo do tempo geológico em idades pré-históricas. Mudanças antropogênicas em ambientes cársticos podem ativar, acelerar ou favorecer a dissolução e subsidência desses terrenos. Newton (1987) atribui à influência humana a responsabilidade de indução e aceleração na criação dessas feições.

Dolinas antropogênicas podem ser induzidas a partir do aumento da descarga d'água para o fluxo subterrâneo. Qualquer alteração no sistema, que produz um desequilíbrio na relação de forças de estabilização de uma cavidade são passíveis de motivar um evento de colapso ou subsidência. Escavações, remoção de vegetação e aumento de carga aplicada na superfície (construções e veículos de grande dimensão) são alguns dos motivadores dessa desestabilização (Parise 2015, Waltham *et al.* 2005).

A dinâmica hídrica também possui papel essencial na estabilidade desses domínios. O aumento da velocidade de fluxo desloca o material inconsolidado para dentro das cavidades do carste e origem as dolinas de subsidência. O aumento da descarga superficial pode ser motivado por fluxo tempestivos concentrados ou por vazamentos locais de tubulações (Waltham *et al.* 2005). A exploração mal dimensionada de água do aquífero também pode induzir a formação de dolinas de colapso. A água, por empuxo, atua como agente sustentador de cavidades subterrâneas, dessa forma, ao extrair mais do que se recarrega, o balanço de forças que agem sobre a cavidade é descompensado (Gutiérrez *et al.* 2014).

3.5 O CARSTE DE CURVELO

A região do carste de Curvelo-Cordisburgo é por muitos considerada o berço da carstologia brasileira, devido aos estudos pioneiros do naturalista dinamarquês Peter W. Lund (1801 – 1880). Lund (1844 *apud* Travassos 2010) apresenta uma hipótese para o desenvolvimento do carste da área, afirmando que cavernas e condutos dali haviam sido formadas por meio da percolação da água a partir de fissuras da cobertura filítica até o calcário subjacente.

Costa *et al.* (2012) atribuem o caráter estratigráfico dessa cobertura à quase completa obliteração das unidades sobrepostas (Figura 2.6) a partir da dissecação cenozoica do relevo, na bacia hidrográfica do Rio das Velhas, após o soerguimento da Serra do Espinhaço. Em Curvelo por tanto, embora haja feições geomorfológicas cársticas relacionadas às rochas da Fm. Lagoa do Jacaré, a unidade teria sido quase totalmente obliterada por processos dissolutivos ao longo da evolução do relevo sendo as morfologias atuais um registro remanescente de um carste muito evoluído.

O domínio solúvel carbonático da Fm. Sete Lagoas encontra-se sotoposto às rochas insolúveis da Fm. Serra de Santa Helena. Esta sucessão estratigráfica normal é corroborada pela descrição litológica de pelo menos 30 poços de bombeamento perfurados na região sob cobertura da Fm. Serra de Santa Helena, cadastrados no SIAGAS e exemplificados na Figura 3.3. A análise dos perfis permite calcular uma profundidade média de 30,55 m para o contato de topo entre as unidades estratigráficas.

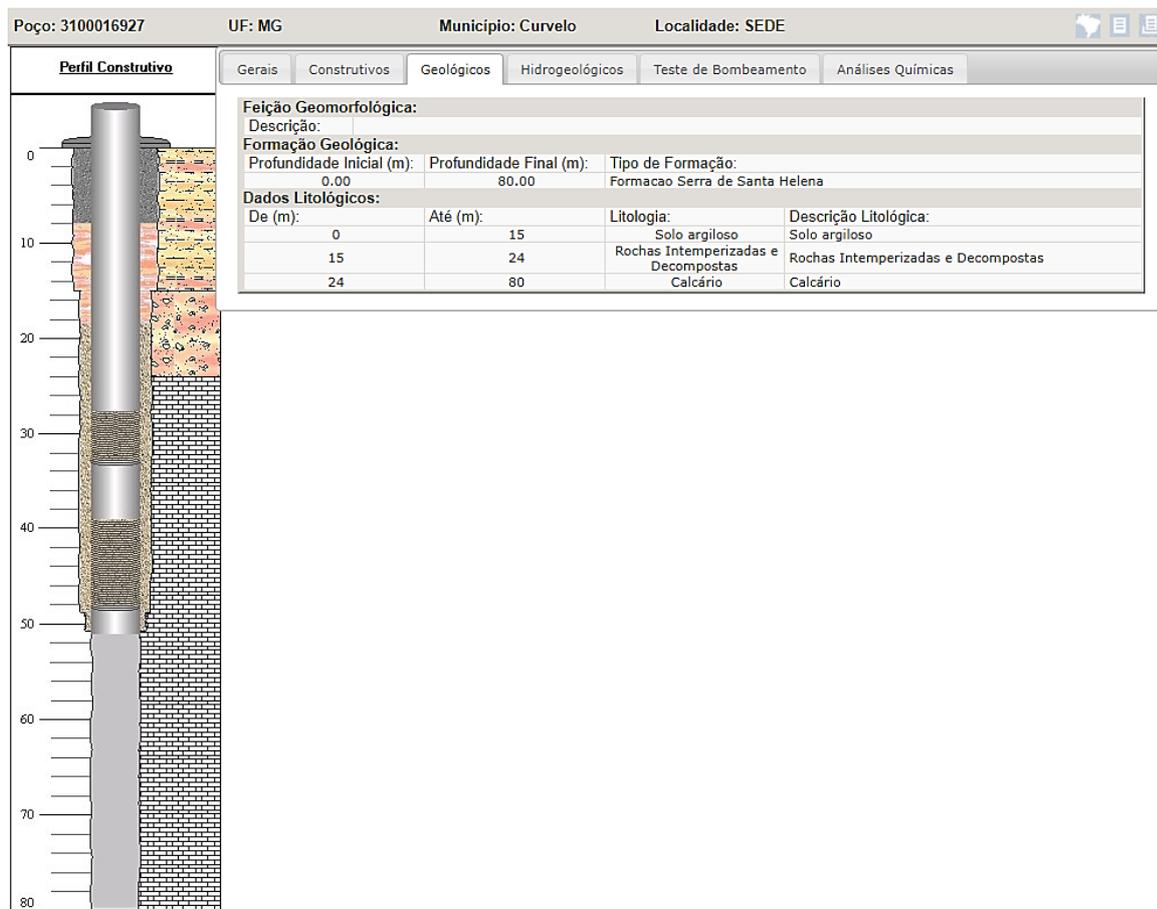


Figura 3.12 – Descrição geológica do poço 3100016927 cadastrado no SIAGAS perfurado à leste da sede municipal de Curvelo.

Goes & Lana (2019) relatam um evento de subsidência abrupta do terreno responsável pela gênese de diversas feições deformacionais em superfície, organizadas em formato elíptico (Figura 3.13) sobre domínios da Fm. Serra de Santa Helena dentro da sede do município de Curvelo. Andrade *et al.* (2019) indicam outras quatro áreas de feição similar nas imediações do ocorrido e, a partir de estudo geofísico terrestre por métodos elétricos, sugerem a presença de cavidade na região, bem como sua associação com descontinuidades geológicas (Figura 3.14).



Figura 3.13 – Feições elípticas, com degraus de abatimento geradas após o evento de subsidência. Modificado de: Goes & Lana (2019)

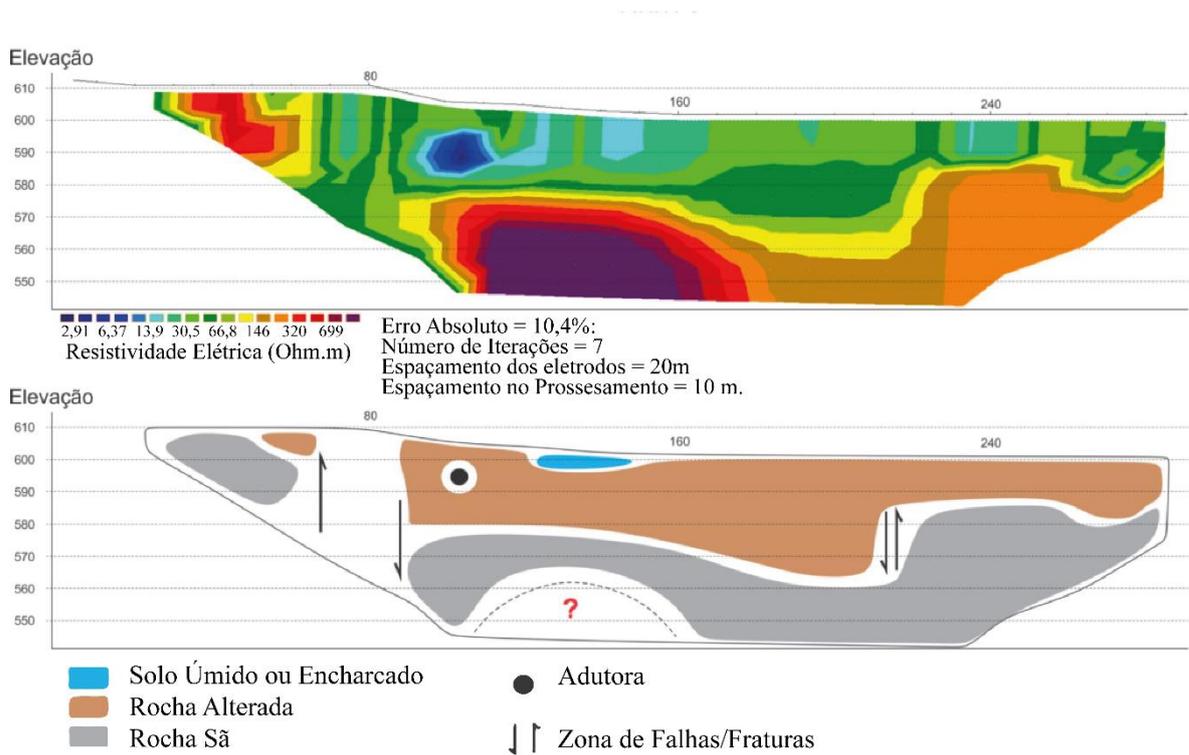


Figura 3.14 – Pseudossessão eletroresistiva por caminhamento elétrico elaborada por Andrade *et al.* (2019) indicando anomalia resistiva (cavidade) a aproximadamente 30 m de profundidade.

CAPÍTULO 4

MÉTODOS GEOFÍSICOS

A geofísica é a ciência que estuda a distribuição interna e superficial das propriedades físicas nas rochas do planeta Terra. As variações laterais e verticais dos entes geológicos podem ser delimitadas por meio da medição do contraste de propriedades físicas.

Os fenômenos físicos que se apresentam no interior da Terra, objetos de estudo da geofísica estão relacionados às propriedades do (a): campo magnético da Terra, propagação de ondas sísmicas, fluxo térmicos, gravidade, campos elétricos e eletromagnéticos, correntes telúricas e radioatividade (Braga 2016). Os levantamentos podem medir campos naturais da Terra (campo magnético, gravitacional, elétrico e eletromagnético), ou artificiais, quando se induz a formação de um campo elétrico ou eletromagnético local para mensurar as características físicas locais (Kearey *et al.* 2009).

Os seguintes tópicos deste capítulo, visam discorrer sobre os métodos geofísicos utilizados na investigação do presente estudo. A fundamentação teórica sobre os métodos geofísicos utilizado no trabalho, está baseada nos trabalhos de Telford *et al.* (1990) e Kearey *et al.* (2009).

4.1 MAGNETOMETRIA

A magnetometria consiste na investigação geológica a partir da identificação de anomalias no campo magnético da Terra resultantes da irregular distribuição de rochas magnetizadas da crosta terrestre (Telford *et al.* 1990).

Um corpo magnetizável, ao ser submetido a um campo magnético, se torna magnético por indução. A magnetização acontece pela reorientação do spin de seus átomos e moléculas. Essa magnetização é medida pela *intensidade magnética* dada pela equação 4.1.

$$\vec{M} = k \cdot \vec{H} \quad (\text{Equação 4.1})$$

Onde \vec{M} é a intensidade magnética adquirida pelo corpo; \vec{H} é o campo magnético externo submetido e k a *suscetibilidade magnética*, unidade adimensional, característica do meio.

A suscetibilidade magnética das rochas é o parâmetro fundamental do levantamento magnetométrico (Telford *et al.* 1990). Essa propriedade define a resposta de rochas e minerais ao serem submetidas a um campo magnético qualquer e está relacionada à quantidade de materiais magnéticos presentes nos mesmos.

A indução magnética expressa o campo magnético total resultante, incluindo o efeito da magnetização do corpo. A indução magnética \vec{B} pode ser expressa pela equação 4.2.

$$\vec{B} = \mu_0 \cdot (\vec{M} + \vec{H}) \quad (\text{Equação 4.2})$$

Onde μ_0 é a *permeabilidade magnética* do vácuo, aproximadamente igual à do ar, e \vec{B} o campo magnético resultante, a partir da Equação 4.1 a Equação 4.2 pode ser escrita como:

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} (1 + k) \quad (\text{Equação 4.3})$$

Num levantamento geofísico mede-se a magnitude do vetor \vec{B} . A unidade mais utilizada para essa grandeza é o nanotesla (nT) e indica o fluxo magnético presente na região da anomalia.

4.1.1 Campo magnético terrestre

A representação do campo magnético total em um determinado ponto da superfície, é dado pelo *vetor campo total* \vec{B} . Este vetor é descrito por suas componentes geométricas. Em qualquer ponto da superfície da Terra, uma agulha magnética livremente suspensa irá adquirir a direção azimutal entre o ponto e o polo norte magnético, essa direção descreve a *componente horizontal* do vetor campo total. O ângulo entre o norte geográfico e essa direção descreve a *declinação magnética* no ponto. O mergulho do vetor campo total, determina a *componente vertical* do campo e é denominado de *inclinação magnética*. Por convenção, a inclinação magnética é verticalmente negativa no polo norte, verticalmente positiva no polo sul e, por consequência, horizontal no equador (Figura 4.1).

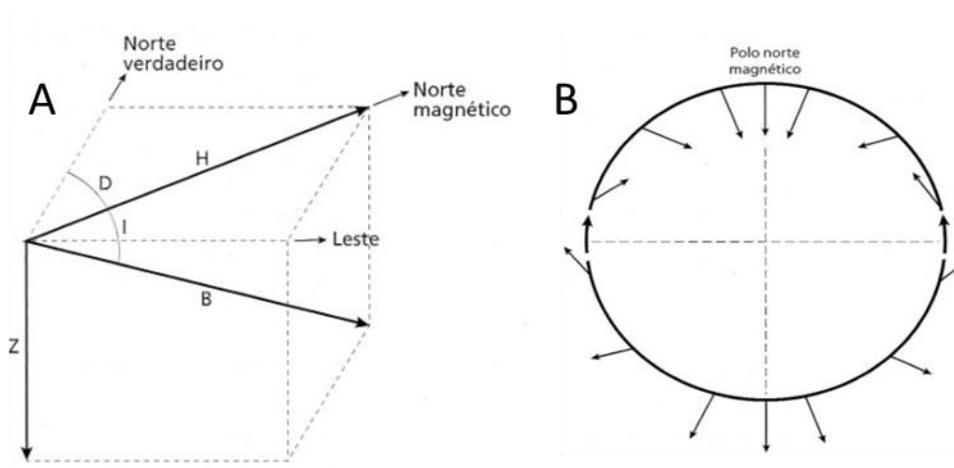


Figura 4.1 – A) Componentes vetoriais do campo magnético terrestre total \vec{B} ; B) variação da inclinação magnética conforme a latitude Modificado de Kearey *et al.* (2009)

4.1.2 Magnetismo das rochas

Toda matéria é magnética em escala atômica. Cada átomo age como um dipolo em razão da trajetória orbital dos elétrons ao redor do núcleo (*spin*). Substâncias *paramagnéticas* apresentam níveis atômicos incompletos, de maneira que seus átomos possuem um momento dipolar fraco. Materiais ferrimagnéticos, como a magnetita, apresentam dipolos paralelos entre si, mas uma diferença de magnitude em determinada direção o torna susceptível a orientação a partir da aplicação de um campo

magnético externo. Já os materiais ferromagnéticos apresentam dipolos espontaneamente orientados, não necessitando da aplicação de um campo magnético externo.

A magnetização de substâncias ferro e ferrimagnéticas a partir de um campo magnético externo é função da temperatura. A intensidade da magnetização decresce com a temperatura e desaparece à *temperatura de Curie* que é característica do material. Tal característica corresponde à temperatura cujos materiais ferromagnéticos adquirem comportamento paramagnético.

Minerais formadores de rocha, em geral, apresentam suscetibilidades magnéticas muito baixas. O grau de suscetibilidade magnética das rochas é representado pelo seu teor de minerais ferromagnéticos, destacando o mais comum, a magnetita (Fe_2O_3). É razoável atribuir o comportamento magnético das rochas ao seu conteúdo global de magnetita (Kearey *et al.* 2009).

Rochas sedimentares apresentam o menor grau de suscetibilidade magnética e rochas ígneas básicas o maior (Telford *et al.* 1990). A proporção de magnetita tende a diminuir com o aumento da acidez de rochas ígneas. Rochas ígneas ácidas embora apresentem magnetismo heterogêneo, são geralmente menos magnéticas que rochas ígneas básicas. Rochas metamórficas também apresentam heterogeneidades magnéticas. O conteúdo de magnetita dessas é predominantemente resultado de alta pressão parcial de oxigênio e cristalização do mineral como acessório (Kearey *et al.* 2009). A Figura 4.2 apresenta as suscetibilidades magnéticas das principais rochas da crosta terrestre.

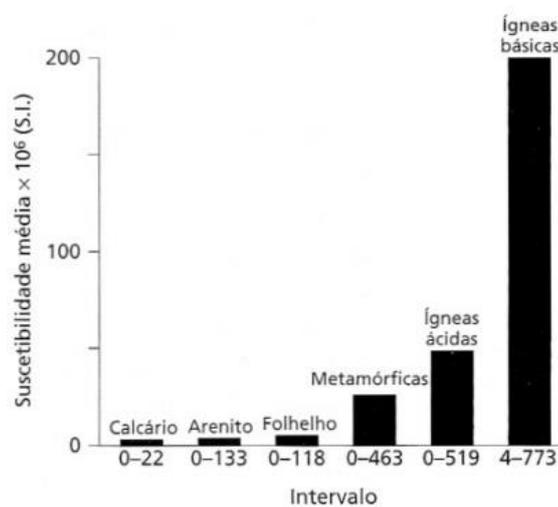


Figura 4.2 – Suscetibilidade magnética de algumas rochas da crosta terrestre. Extraído de Kearey *et al.* (2009).

Causas comuns de anomalias magnéticas incluem a presença de diques, soleiras, falhas e dobramentos do embasamento, e de jazidas minerais de magnetita. Em investigações geológicas, o levantamento magnético pode ser utilizado para delimitar zonas de falha do embasamento. Na ausência

de sedimentos magnéticos relevantes, as anomalias fornecem importantes informações acerca da forma e da natureza do embasamento cristalino (Kearey *et al.* 2009).

4.1.3 Tratamento dos dados

Após coletados, os dados geomagnéticos devem passar por um tratamento. Correções são feitas buscando eliminar de variações devidas a causas não geológicas. Filtragens podem ser feitas visando eliminar efeitos geológicos não desejáveis e/ou evidenciar desejáveis.

Anomalias magnéticas consistem em desvios do campo magnético normal da Terra. O campo normal da Terra é, por convenção, determinado pelo IGRF. Para se extrair uma anomalia magnética, deve-se subtrair do valor levantado o campo magnético de referência (Telford *et al.* 1990). O mapa produto dessa operação é denominado de Campo anômalo.

A correção diurna visa eliminar a variação do campo magnético terrestre que ocorre durante o dia. Para tal, medidas de correção constantes em dados pontos, devem ser feitas durante o dia do levantamento. A correção topográfica visa diminuir a influência de grandes altos topográficos magnetizados no levantamento, porém é pouco utilizada uma vez que é o conhecimento preciso sobre a topografia e distribuição espacial da magnetização não é algo simples de se obter.

A transformação desses dados, do domínio da frequência para o domínio do espaço, é feita pela transformada de Fourier. Essa operação relaciona a frequência do sinal geofísico com a profundidade da fonte emissora (Telford *et al.* 1990). Os filtros de Fourier (Tabela 4.1) são utilizados buscando evidenciar alguma característica geofísica de acordo com a necessidade de investigação.

Tabela 4.1 – Filtros de Fourier e suas respectivas finalidades geofísicas. Extraído de Barbosa & Oliveira (2020).

	Filtros	Finalidade Geofísica
Derivadas	Gradiente vertical (1ª derivada)	Evidencia estruturas superficiais.
	Gradiente residual (2ª derivada)	Remove anomalias regionais e realça anomalias locais.
	Gradiente horizontal em X	Evidencia estruturas N-S.
	Gradiente vertical em Y	Destaca estruturas E-W.
	Amplitude do sinal analítico	Projeção em superfície das anomalias em profundidade.
	Tilt Derivativo	Derivada do ângulo de inclinação da anomalia. Fornece uma estimativa do local de origem dos dados magnéticos.
Continuação	Para cima	Retira anomalias superficiais.
	Para baixo	Retira anomalias mais profundas (instável).
Frequência	Passa banda	Determina intervalo de frequência.
	Passa alta	Retira dados de baixa frequência, obtendo informações mais superficiais.
	Passa baixa	Retira dados de alta frequência, obtendo informações mais profundas.

4.1.3.1 Técnicas de alta centricidade

O campo magnético da Terra possui caráter dipolar. Buscando diminuir a complexidade da interpretação de anomalias magnéticas, as técnicas de alta centricidade foram desenvolvidas. Existem basicamente, três dessas técnicas, a redução ao Polo (torna vertical o campo magnético observado), a redução ao Equador (horizontalização do campo magnético) e a Amplitude do Sinal Analítico (ASA).

Também conhecida como Método do Gradiente Total, a técnica ASA é obtida a partir das derivadas direcionais do campo magnético nos três eixos cartesianos. Tal operação (Equação 4.4) acentua a borda dos corpos magnéticos e centralizam a anomalia em relação a sua fonte.

$$ASA = \sqrt{\left[\left(\frac{\delta\vec{B}}{\delta x}\right)^2 + \left(\frac{\delta\vec{B}}{\delta y}\right)^2 + \left(\frac{\delta\vec{B}}{\delta z}\right)^2\right]} \quad (\text{Equação 4.4})$$

4.1.3.2 Deconvolução de Euler

A Deconvolução de Euler (D.E.) é um rigoroso método para determinação da profundidade de fontes magnéticas (Kearey *et al.* 2009). A Equação 4.4 descreve a relação de homogeneidade de Euler (Reid *et al.* 1990).

$$N (\vec{B} - \vec{T}) = (x - x_0) \frac{\delta\vec{T}}{\delta x} + (y - y_0) \frac{\delta\vec{T}}{\delta y} + (z - z_0) \frac{\delta\vec{T}}{\delta z} \quad (\text{Equação 4.5})$$

Onde, (x_0, y_0, z_0) é a localização de uma fonte magnética cuja anomalia magnética de campo total no ponto (x, y, z) é \vec{T} e \vec{B} é o campo regional. E z é a altitude do levantamento, x e y as coordenadas do ponto de medição. N é a medida da taxa de decaimento da intensidade do campo, em função do aumento da distância entre a fonte e o ponto medido. N é um parâmetro indicador da forma geométrica da anomalia e recebe o nome de índice estrutural (Reid *et al.* 1990). Os índices estruturais N para dados magnetométricos, relativo a simplificações geométricas de estruturas geológicas, estão expostos no Quadro 4.1.

Quadro 4.1 – Índices estruturais N para dados magnetométricos relacionados às estruturas. Modificado de Luiz & Silva (1995)

Estrutura	Índice Estrutural N
Falhas, fraturas, soleiras e diques	1
Estruturas cilíndricas	2
Corpos esféricos	3

Salem & Ravat (2003) ressaltam que a aplicação da Deconvolução de Euler em anomalias ASA, facilitam a interpretação de dados magnéticos em profundidade. O método proposto pelos autores utiliza as coordenadas (x_0, y_0) obtidas pelo ASA, para calcular pela Deconvolução de Euler a coordenada z de origem da anomalia (máxima amplitude).

4.2 RADIOMETRIA

A radiometria consiste em um método geofísico que caracteriza a composição da superfície terrestre, com base na concentração de determinados isótopos químicos. A concentração destes elementos é medida indiretamente a partir da contagem de partículas recebida em determinado ponto do levantamento provenientes do decaimento radioativo deles.

4.2.1 Decaimento radioativo

A desintegração de alguns elementos químicos irradia espontaneamente energia por meio de ondas eletromagnéticas. A desintegração é acompanhada pela emissão de partículas e radiação de três diferentes tipos: Partículas *alpha* são núcleos de ${}^4_2\text{He}$ emitidos do núcleo durante certas desintegrações; partículas *beta* são elétrons emitidos quando o nêutron se divide em um próton e um elétron algumas desintegrações; já os raios gama são radiação eletromagnética pura, com frequências maiores que 10^{16}Hz , liberada a partir da desintegração de núcleos atômicos excitados (Kearey *et al.* 2009).

As emissões radioativas têm propriedades de penetração diferentes. Partículas alpha são bloqueadas por uma folha de papel não podendo ser detectadas em levantamentos radiométricos, a beta por uma folha de alumínio sendo detectadas somente em levantamentos terrestres. Os raios gama apresentam uma penetração em alguns centímetros de chumbo e por essa propriedade conseguem ser detectados tanto em levantamentos terrestres como em aerolevantamentos.

4.2.2 Radioatividade em rochas e minerais

Embora haja mais de 20 elementos naturalmente radioativos conhecidos, somente o urânio (U), tório (Th) e o potássio (K) são utilizados na radiometria. O grau de radioatividade e a litofilia desses elementos, em rochas da crosta, torna-os úteis para a prospecção geofísicas.

Traço de minerais radioativos são encontrados em todos os tipos de rocha, porém, determinadas litologias apresentam maiores concentrações de acordo com sua gênese. Em geral, rochas sedimentares ou metassedimentares tendem a ter maiores concentrações desses elementos em relação a rochas ígneas e meta-ígneas, com exceção a ígneas ácidas (Telford *et al.* 1990). As diferentes concentrações de isótopos em cada litologia permitem delimitar limites contato entre elas, embora muitas vezes não representem os limites reais, uma vez que os isótopos também podem se dispersar no solo.

A detecção dos isótopos em levantamentos radiométricos é apresentada como o número de contagem de emissões num período fixo. O dado pode ser obtido a partir de *cintilômetros*, aparelhos que contam o total de cintilações recebidas não distinguindo a origem (contagem total), ou por *espectrômetros*, aparelho que separa em canais as cintilações com base nos isótopos de interesse (Telford *et al.* 1990, Kearey *et al.* 2009).

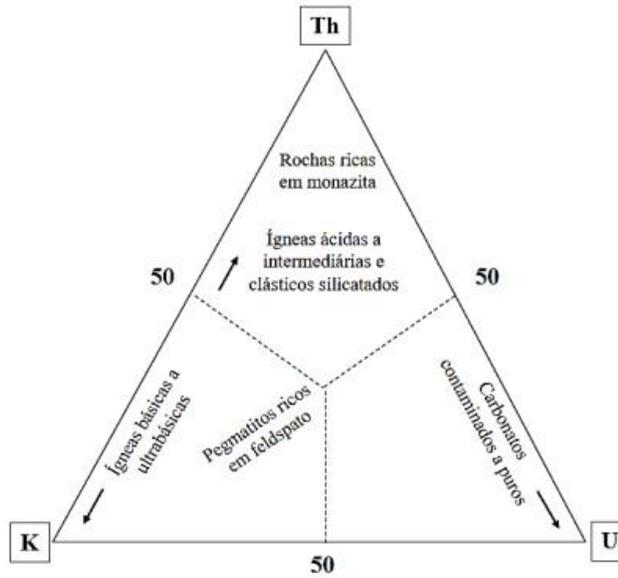


Figura 4.3 – Conteúdo de elementos radioativos nos diferentes tipos e composições de rochas. (Modificado de Kearey *et al.* 2009)

CAPÍTULO 5

ANÁLISE QUALIQUANTITATIVA

A análise qualitativa apresentada neste capítulo busca demonstrar os resultados obtidos a partir da caracterização 2D dos bancos de dados geofísicos utilizados, de maneira a detectar padrões, texturas, direções e cores dos mapas geofísicos, essenciais para o esboço de regiões similares, classificando-as em fácies (Dentith & Mudge 2014), a fim de se estabelecer uma correlação e aprimoramento do contexto litogeológico previamente mapeado da região. A caracterização de lineamentos magnéticos propõe uma relação entre a distribuição dessa propriedade física e o contexto morfoestrutural da área de estudo.

A análise quantitativa deste trabalho propõe a aplicação da Deconvolução de Euler nos dados de amplitude do sinal analítico (ASA) em uma determinada porção da área. Esse tratamento matemático permitiu avaliar as profundidades média das fontes de anomalia magnética.

Este capítulo busca apresentar os bancos de dados geológicos e geofísicos utilizados e demonstrar os produtos gerados a partir de uma análise quali quantitativa deles. Os mapas geofísicos foram gerados a partir do software *Geosoft Oasis Montaj* (versão 8.4) e integrados aos dados geomorfológicos e geológicos no software *ArcGIS* (versão 10.3).

5.1 BANCO DE DADOS

A aquisição dos dados geofísicos aqui tratados advém dos Programas de Levantamento Aerogeofísico de Minas Gerais (PLAMG) realizado pela LASA Engenharia e Prospecções S.A no ano de 2008. Os limites municipais de Curvelo, se inserem na área 10 (Belo Horizonte-Curvelo-Três Marias) dos levantamentos aeromagnetométricos e aeroradiométricos realizados pela empresa, encomendados pelo governo estadual de Minas Gerais e governo federal (Figura 5.1).

O levantamento aerogeofísico da área 10 fez parte do Programa 2008/2009 dos PLAMG, projeto nº 3017. Neste projeto, foram percorridas 87.212,45 Km de linhas de voo espaçadas em 500 m em direção Norte-Sul, com linhas de controle a cada 10 Km em direção Leste-Oeste. A aeronave manteve uma altura de voo de 100 metros, com os sensores magnetométricos realizando leituras em intervalos de 0,1s e os radiométricos a cada 1s. Foram recobertos, ao todo, uma área de aproximadamente 41.081,830 Km².

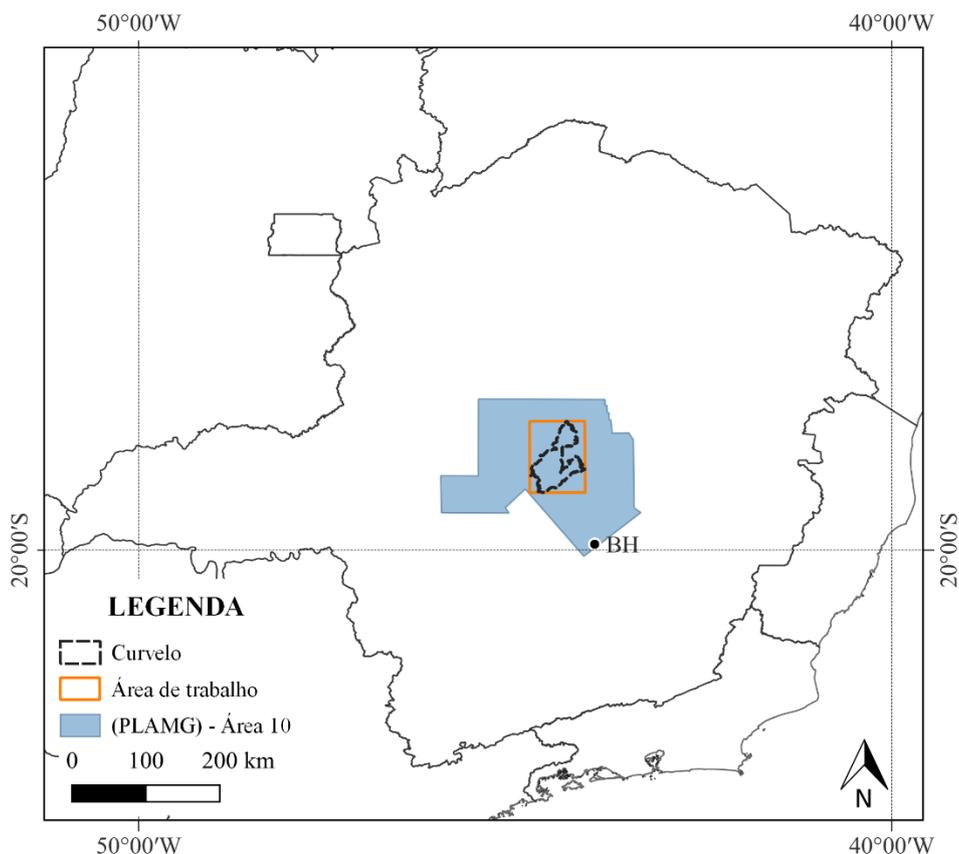


Figura 5.1 – Localização da área 10 dos Programas de Levantamento Aerogeofísico de Minas Gerais (PLAMG) utilizado neste trabalho.

5.2 ANÁLISE MAGNETOMÉTRICA

O tratamento dos dados geomagnéticos permitiu, na análise qualitativa, a geração de mapas que possibilitam a visualização e interpretação de feições estruturais da região a partir da aplicação de filtros. Diferentes técnicas de filtragem foram utilizadas propósito de realçar, atenuar ou eliminar feições do mapa de campo anômalo da área de trabalho.

A interpretação quantitativa dos dados se deu pelo cálculo da profundidade das fontes de anomalias magnéticas em uma porção da área de trabalho a partir da Deconvolução de Euler. Esse tratamento matemático dos dados permite analisar aproximadamente a localização e profundidade média dessas fontes, bem como estimar a sua geometria. Este trabalho realizou a Deconvolução a partir dos dados magnéticos de amplitude do sinal analítico (ASA).

A base de dados bruta, advinda do levantamento citado no tópico anterior, foi processada pelo Serviço Geológico do Brasil – CPRM, com objetivo de produzir um arquivo *geodatabase* (*.gdb) com os dados de toda a área levantada. O arquivo *.gdb consiste em uma planilha, onde cada linha representa um ponto da superfície terrestre levantada com cada coluna correspondendo a uma magnitude relevante

ao tratamento dos dados. As anomalias magnéticas são obtidas a partir da subtração do campo magnético medido com o campo magnético definido (IGRF).

Este trabalho, realizou a importação desta base de dados para o *software Oasis Montaj 8.4*, e gerou o arquivo *grid* com os dados magnéticos de campo anômalo (CA) da região de Curvelo, obtendo um novo *.gdb, restrito da área de interesse. Pela rotina WINXY os dados foram processados segundo a Transformada Rápida de Fourier, obtendo o mapa de campo anômalo da área.

5.2.1 Análise magnetométrica qualitativa

A rotina MAGMAP foi utilizada para aplicação e produção dos mapas de filtragem (Tabela 4.1) em uma malha regular de 125 m pelo método da mínima curvatura. Foi obtido, primeiramente, o mapa de amplitude do sinal analítico (ASA) e posteriormente os mapas de derivadas horizontais e vertical. As derivadas horizontais em x e y realçam estruturas nas direções Norte-Sul e Leste-Oeste, respectivamente. A primeira e a segunda derivada vertical em z realçam anomalias em profundidade mais altas (Figura 5.2).

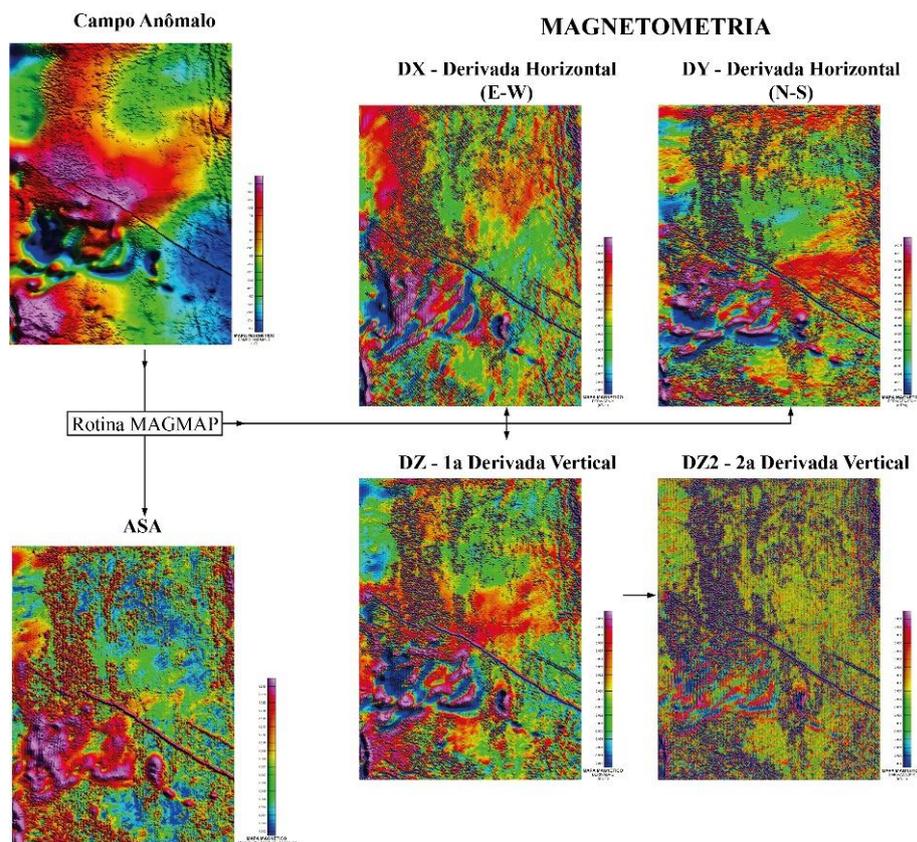


Figura 5.2 – Fluxograma dos mapas magnetométricos gerados: DX– primeira derivada horizontal (E-W); DY – primeira derivada horizontal (N-S); DZ – primeira derivada vertical; DZ2 - segunda derivada vertical; ASA – Amplitude do Sinal Analítico.

Os mapas ASA são comumente utilizados para delinear falhas e contatos geológicos. Tais mapas apresentam o dado magnético de maneira monopolar e encerram sinais com grande variação de amplitude, os quais se superpõem e refletem fontes situadas a várias profundidades, com diferentes geometrias e contrastes de suscetibilidade (Ferreira *et al.* 2010). A interpretação magnetométrica qualitativa da área de estudo foi fundamentada principalmente na análise do mapa de amplitude do sinal analítico. Foram derivados dois produtos diretos dessas análises. Os mapas de classificações de fácies para regiões com resposta magnética semelhante (magnetofácies) e a roseta de lineamentos magnéticos.

As magnetofácies (Figura 5.3) foram dadas de acordo com a variação da amplitude e do comprimento de onda apresentados pela Tabela 5.1. A magnetofácies 1, de baixa amplitude e grandes comprimentos de onda, corresponde as regiões de anomalias negativas representadas pelo espectro azul a verde no mapa ASA, compreendendo regiões relativamente pequenas ao sul e centro-norte da área. A magnetofácies 2, de amplitudes e comprimentos de onda medianos, estão representadas no ASA nas colorações amarelo e laranja. A magnetofácies 3, de anomalias positivas e pequenos comprimentos de onda, é representada no ASA pelas colorações vermelho e magenta.

Tabela 5.1 – Magnetofácies baseadas nas intensidades de magnetização e comprimento de onda dadas pelo mapa de Amplitude do Sinal Analítico.

Magnetofácies	Intervalo	Espectro de cor (ASA)	Descrição
1	0,00 – 0,0075 nT/m		Anomalias negativas de amplitude mais baixa e maiores comprimentos de onda.
2	0,0075 – 0,0130 nT/m		Anomalias intermediárias com amplitudes e comprimentos de onda medianos.
3	Acima de 0,0130 nT/m		Anomalias positivas de amplitude mais alta e menores comprimentos de onda.

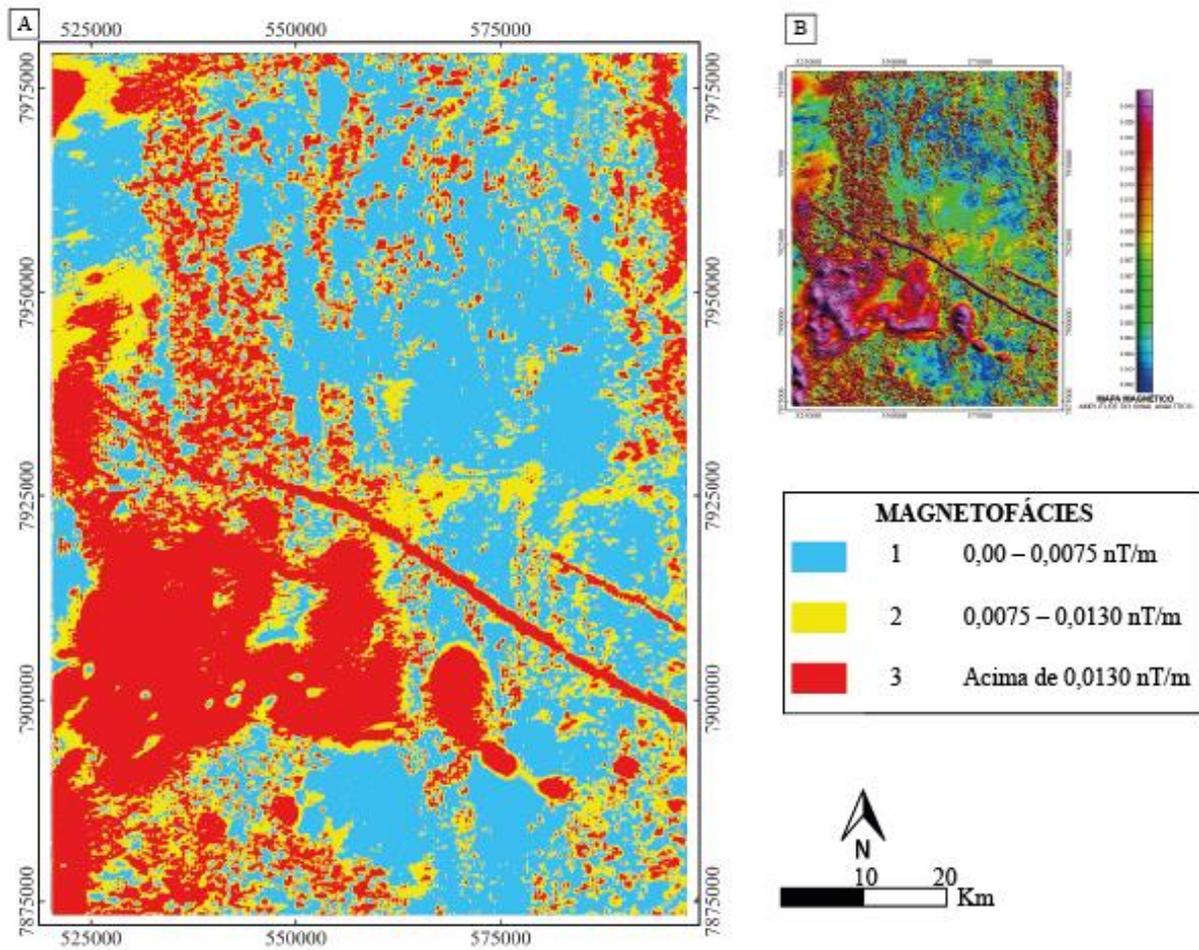


Figura 5.3 – A) Mapa de magnetofácies obtidos a partir do mapa de amplitude do sinal analítico; B) Mapa de amplitude do sinal analítico.

Foram analisados, a partir do mapa ASA, os lineamentos que marcam a disposição de traços estruturais da área. Foram traçados ao todo 358 lineamentos a partir das anomalias magnéticas pelo software *ArcGis 10.3*. Sendo posteriormente utilizando a ferramenta COGO para a obtenção da direção e o comprimento de cada linha traçada. As direções azimutais desses lineamentos foram plotadas no software *Openstereo*, cujo produto foi a roseta apresentada na Figura 5.4b. O azimute preferencial geral dos lineamentos magnéticos da área foi 321, 1°.

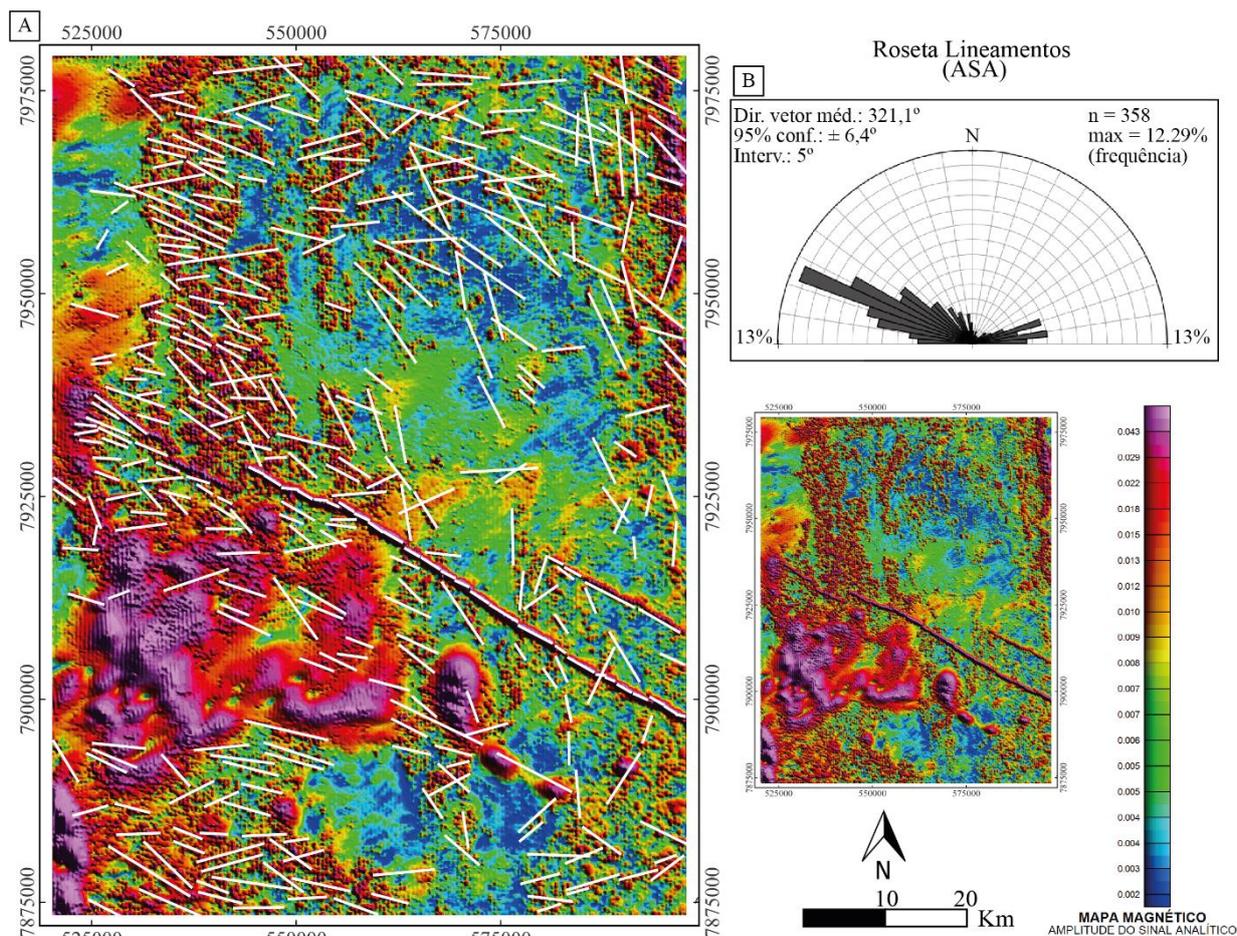


Figura 5.4 – A) Mapa de lineamentos magnéticos, obtidos a partir do mapa ASA.; B) Roseta com as direções preferenciais e dados estatísticos.

5.2.2 Análise magnetométrica quantitativa

A análise quantitativa dos dados geomagnéticos se deu pelo cálculo da profundidade das anomalias a partir da deconvolução de Euler de uma região arbitrada próximo a sede municipal de Curvelo. A estimativa das profundidades das fontes magnéticas foi obtida a partir do *software* livre EULDEP desenvolvido por Durrheim & Cooper (1998), utilizando os dados de Amplitude do Sinal Analítico.

Foram traçados 10 perfis (Figura 5.5) de 19,71 Km de comprimento cada, com direção NE-SW espaçados em 2 Km (Tabela 5.2 A escolha da localização dos perfis foi arbitrada a partir da análise de lineamentos magnéticos no mapa de ASA e da análise da localização e disposição de poços de bombeamento com aquíferos cársticos da região. Foi observado que alguns poços exibiam alinhamento ao longo de uma estrutura linear magnética de direção azimutal de aproximadamente 150 °. A este conjunto de lineamentos, dada a sua importância para o estudo, foi atribuído o nome de de AZ-150, foram escolhidos perfis com direção aproximadamente perpendicular a eles.

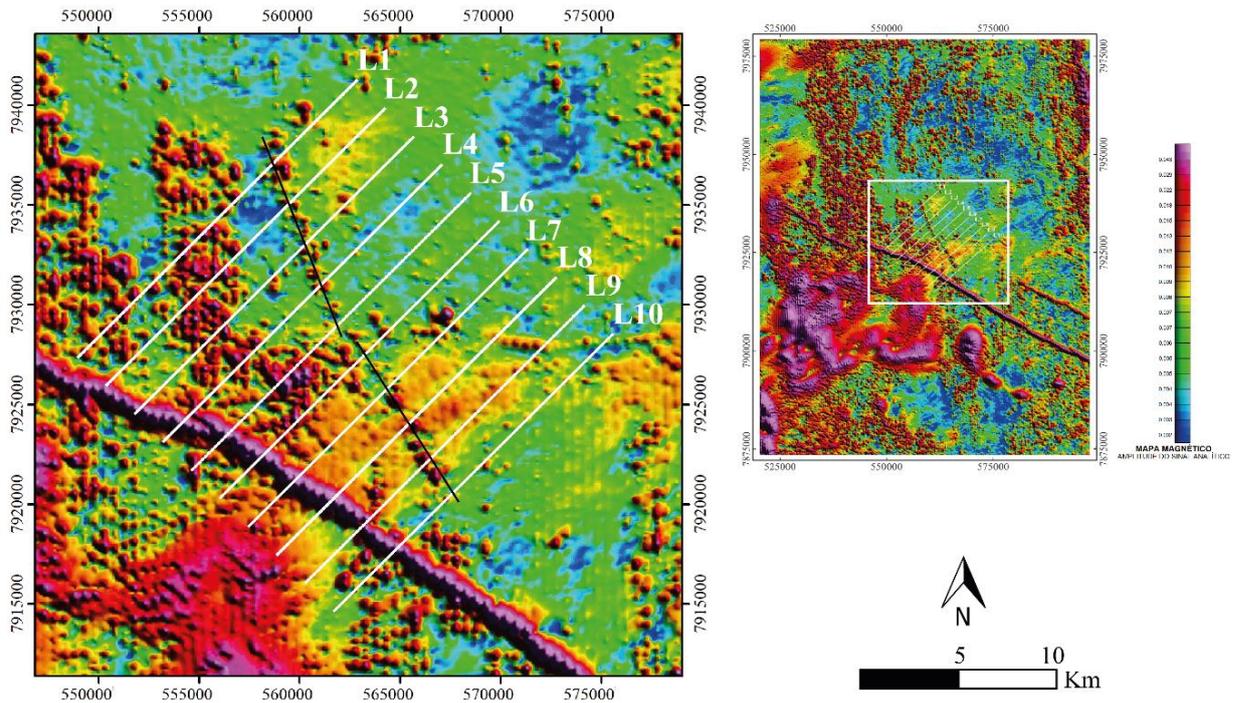


Figura 5.5 – Mapa ASA com a localização dos perfis traçados para a deconvolução de Euler. Em preto, destacam-se os lineamentos magnéticos identificados próximos a Curvelo denominados de AZ-150.

Foram obtidos pelo *Oasis montaj* 10 perfis de amplitude do sinal analítico e posteriormente processados no EULDEP. Para a execução dos perfis de deconvolução foi utilizado índice estrutural 1.0 (Quadro 4.1), de estruturas planares, com janelas de tamanho 11. Os valores máximos e mínimos para as profundidades estimadas das anomalias estão apresentados na Tabela 5.2 e o histograma de frequência das profundidades na figura 5.6. Baseado nas profundidades obtidas foi gerado o modelo de visualização 3D das anomalias (Figura 5.7).

HISTOGRAMA DE FREQUÊNCIA
(Profundidade das Amostras)

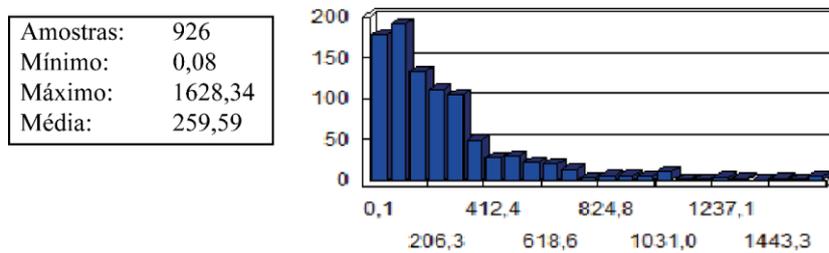


Figura 5.6 - Distribuição estatística da profundidade calculada para as anomalias magnéticas

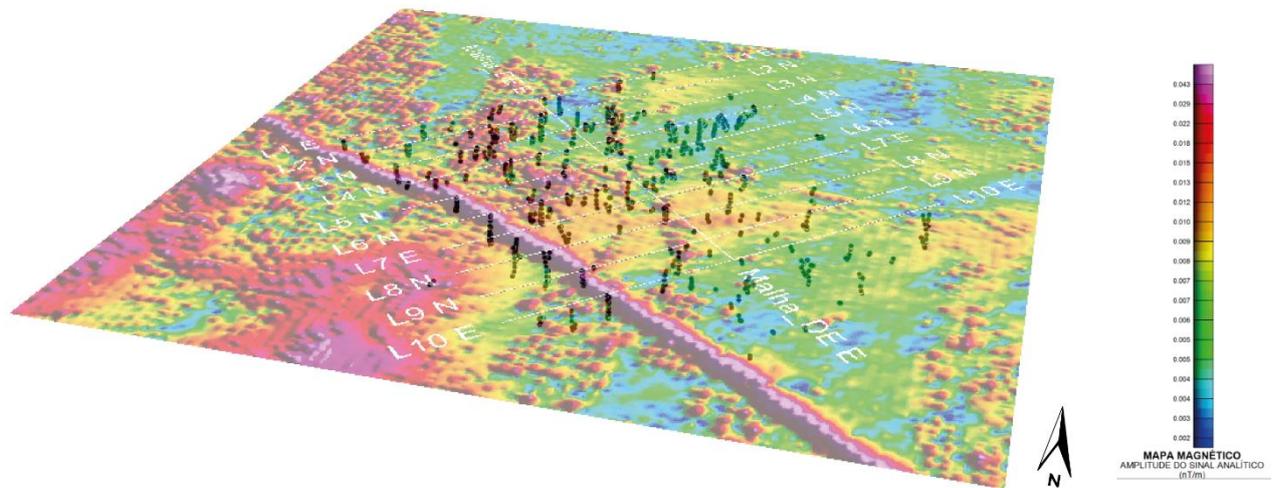


Figura 5.7 – Resultado tridimensional da Deconvolução de Euler para os 10 perfis com exagero vertical 5x. Sobrepondo-os o mapa de Amplitude do Sinal Analítico.

Tabela 5.2 – Tabela com os dados espaciais de cada perfil calculado.

Perfil	X₀/Y₀ SIRGAS 2000 23S	Profundidade mín. de anomalias (m)	Profundidade max. de anomalias (m)
1	548950/7927322	4,17	1237,61
2	550378/7925904	5,12	1103,69
3	551786/7924496	0,75	1607,38
4	553224/7923068	0,08	557,28
5	554603/7921659	1,66	1628,34
6	556021/7920241	0,12	964,59
7	557497/7918843	7,57	704,02
8	558935/7917405	10,54	1480,09
9	560256/7915929	4,94	1285,43
10	561693/7914608	8,53	689,96

Com os dados vetoriais de localização e profundidades das anomalias obtidos, foi efetuada a interpolação dos pontos pelo método da krigagem ordinária, gerando o modelo tridimensional das superfícies das anomalias magnéticas da subárea. Permitindo a interpretação espacial dos dados bidimensionais (Figura 5.7).

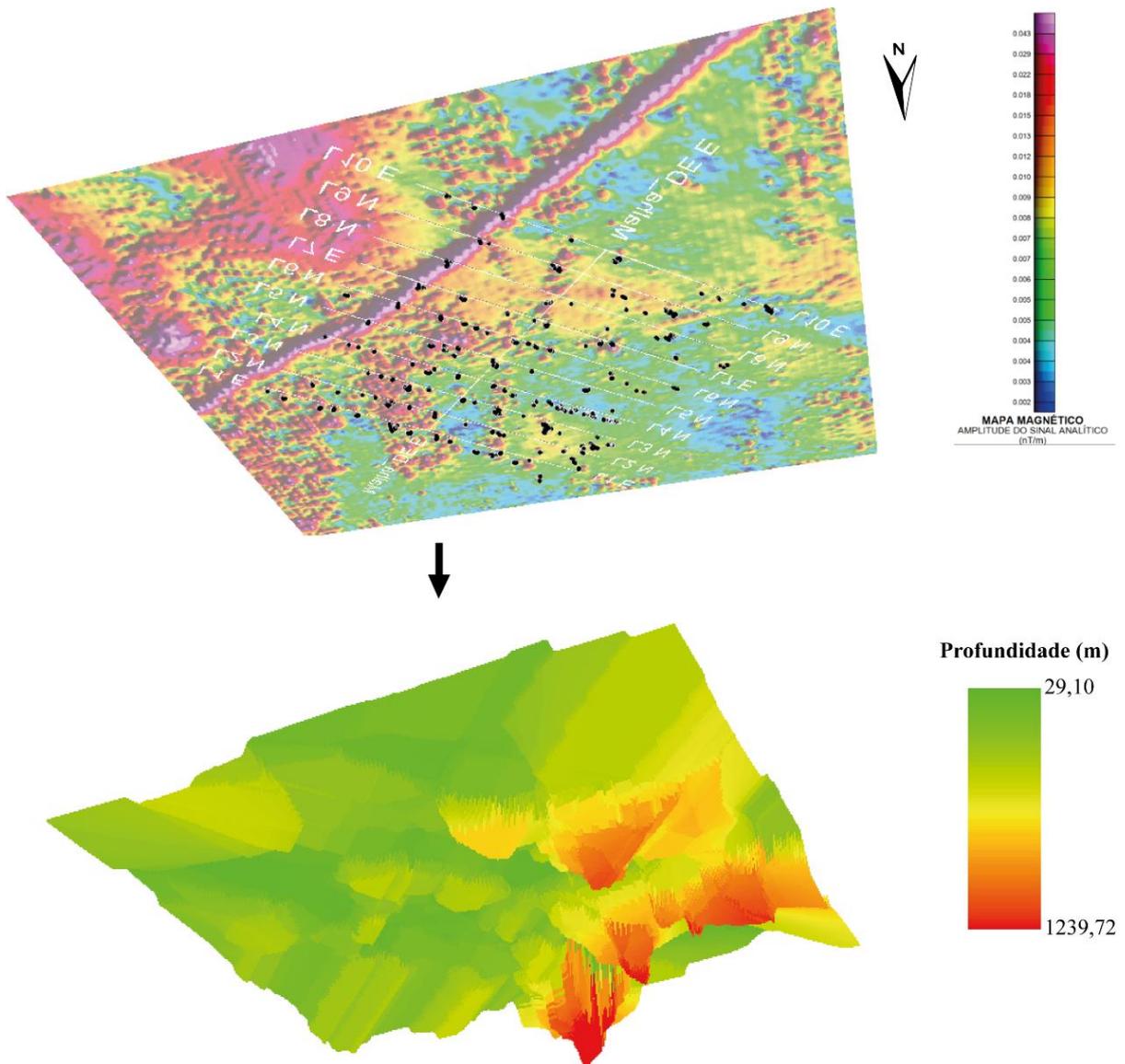


Figura 5.8 – Fluxograma espacial com o resultado da Deconvolução de Euler. A superfície de interpolação apresenta exagero vertical de 5x.

Dos 10 perfis traçados na subárea, foi selecionado a linha central (L5) para a caracterização subsuperficial da área de estudo. Esse perfil interceptam os lineamentos NNW-SSE que possivelmente atuam como condicionantes ao desenvolvimento de dolinas na região próxima a sede municipal de Curvelo. O resultado obtido pela deconvolução de Euler dessa linha está apresentado na Figura 5.9.

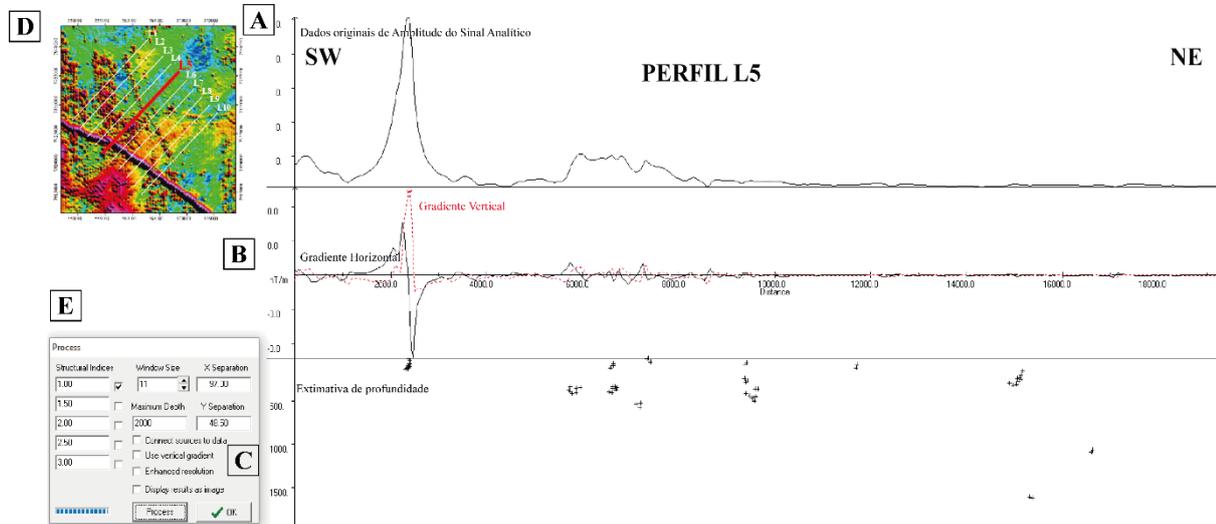


Figura 5.9 – Deconvolução de Euler do perfil L5. A) Dado original de ASA, B) gradiente H (vermelho) e V (preto), C) Estimativa de profundidade, D) localização do perfil L5 e E) parâmetros utilizados.

5.3 ANÁLISE RADIOMÉTRICA

A aplicação da radiometria se dá pela relação entre as diferentes concentrações dos elementos radioativos tório (Th), urânio (U) e potássio (K) nas rochas da superfície terrestre. A radiação gama emitida por esses elementos em diferentes comprimentos de onda possui baixa penetrabilidade no terreno, permitindo a caracterização superficial de solos e rochas.

A interpolação do banco de dados gamaespectométrico da área 10 foi realizada pelo método da mínima curvatura, gerando os *grids* de contagem total levantada para cada um dos elementos na área de estudo, em partes por milhão. A partir dos *grids* foram produzidos oito mapas (Figura 5.10): mapas de concentração de potássio, urânio e tório; mapas de razão entre as concentrações U/Th, U/K e Th/K; mapa de contagem total; e a imagem ternária com distribuição de cores CMY, para respectivamente K, U, Th.

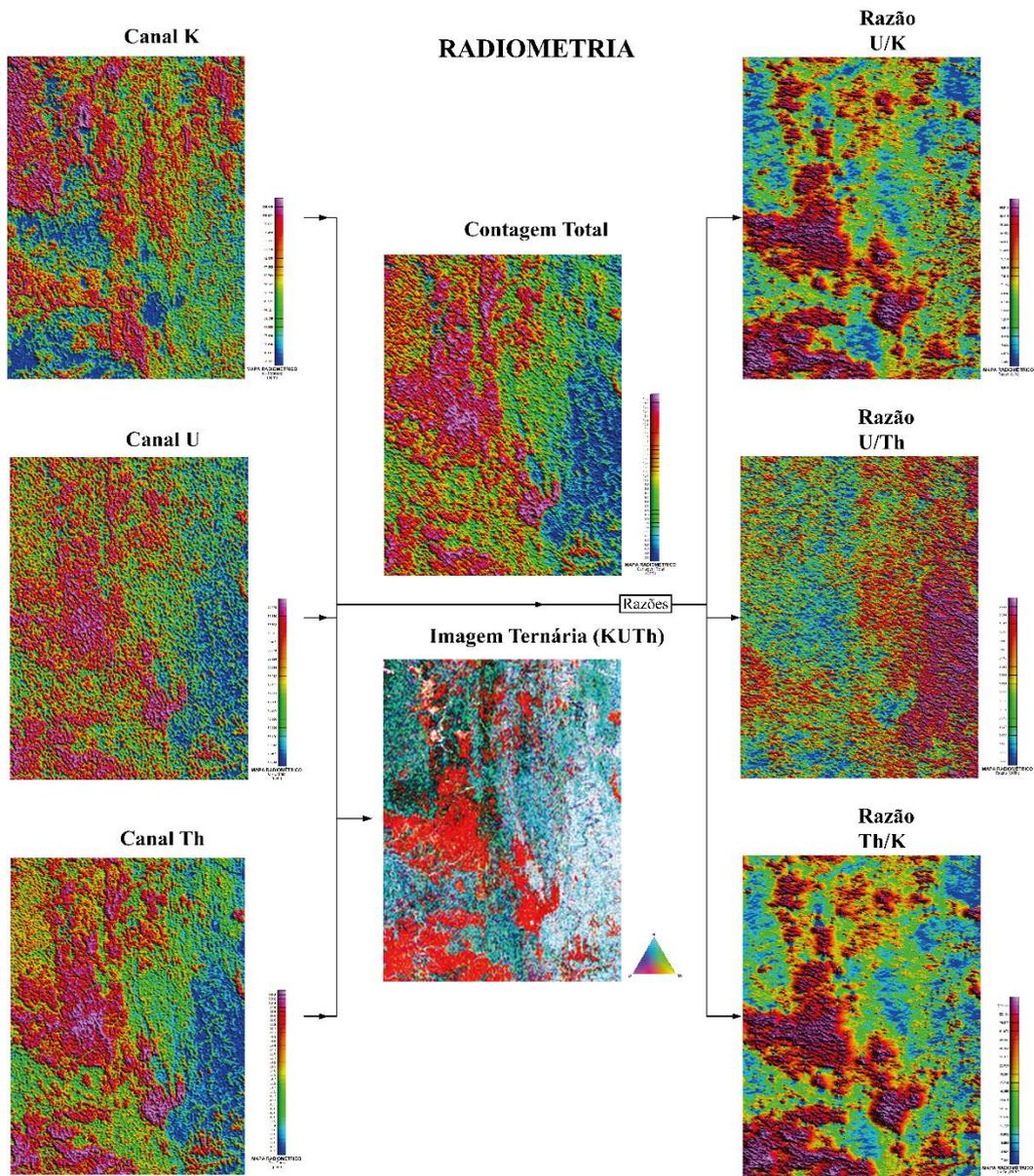


Figura 5.10 – Fluxograma dos mapas radiométricos gerados: Na primeira coluna, os mapas de canal isotópico gerados: potássio (K), tório (Th) e urânio (U); Na segunda coluna, mapas multielemento de Contagem Total e imagem Ternária; Na terceira coluna, os mapas de razão isotópica: U/K, U/Th e Th/U.

A partir da imagem ternária, foram classificadas 6 radiofácies (Figura 5.11) levando em consideração a variação das concentrações de K, U e Th. A definição e divisão realizada a partir dessas variações analisadas é descrita na Tabela 5.3.

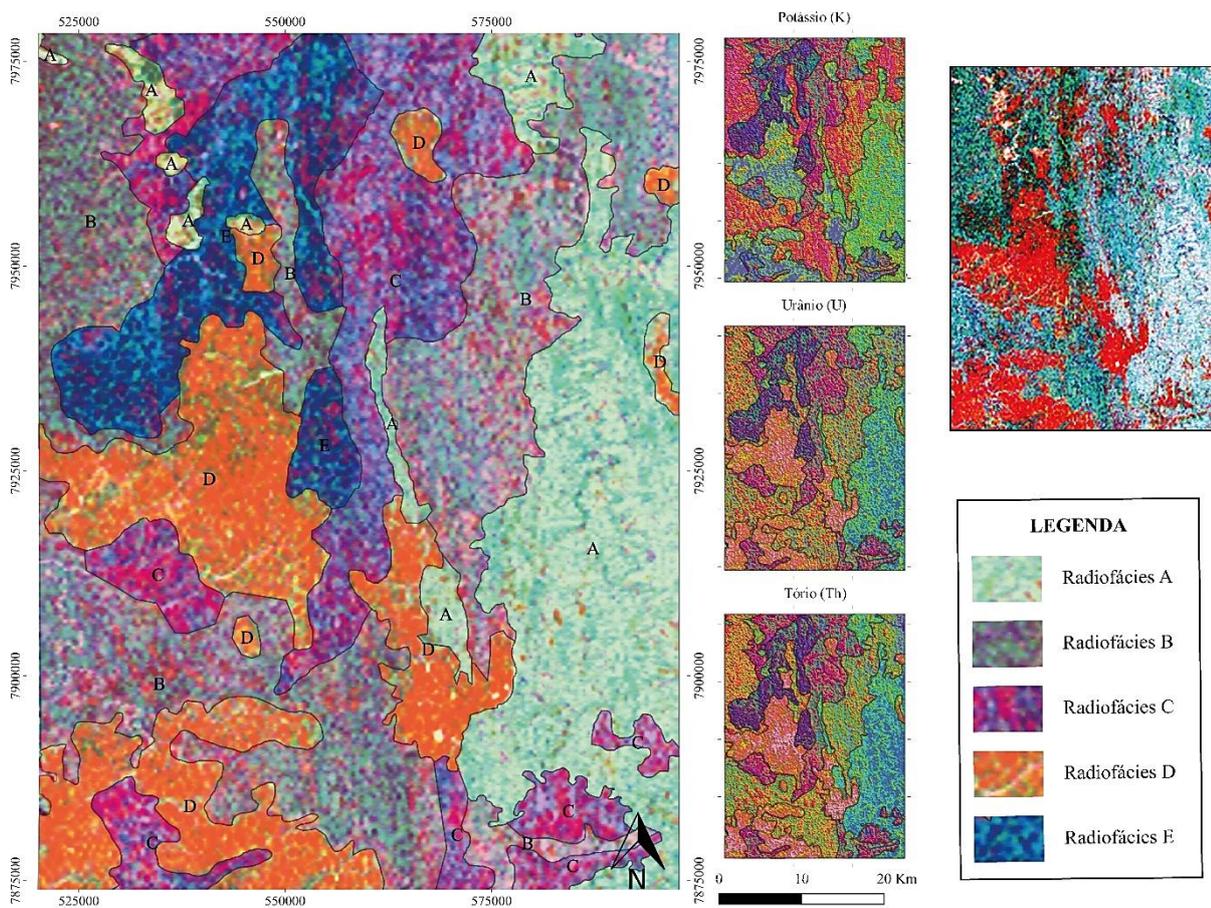


Figura 5.11 – A esquerda, radiofácies subdividindo imagem ternária; A direita, radiofácies subdividindo os mapas de canal (K, U e Th) e imagem ternária crua, respectivamente.

Utilizando dos mapeamentos das folhas Andrequicé (SE.23-Z-A-I), Corinto (SE-23-Z-A-II), Morro da Garça (SE-23-Z-A-IV), Curvelo (SE-23-Z-A-V), Pompéu (SE-23-Z-C-1) e Sete Lagoas (SE-23-Z-C-II) as radiofácies foram relacionadas as unidades mapeadas na região (Tabela 5.3). A utilização das radiofácies auxiliou na elaboração de um mapa geológico da área estudada sem a presença de contatos abruptos nos limites entre as folhas.

Tabela 5.3 – Radiofácies determinadas, principalmente, a partir da análise da imagem Ternária e secundariamente com os mapas de canal.

Radiofácies	Teor de K	Teor de U	Teor de Th	Unidades
A	Baixo/Médio	Baixo	Baixo	Fm. Serra de Santa Helena, Depósitos sedimentares.
B	Médio/Alto	Baixo	Baixo	Fm. Lagoa do Jacaré, Fm. Serra de Santa Helena, Formação Três Marias, Depósitos sedimentares.
C	Médio	Médio a alto	Médio a alto	Formação Serra de Santa Helena.
D	Baixo	Alto	Alto	Coberturas Lateríticas/Aluvionares.
E	Alto	Alto	Alto	Formação Serra da Saudade, Formação Três Marias, Coberturas Lateríticas.

CAPÍTULO 6

INTEGRAÇÃO GEOFÍSICA-GEOLÓGICA

A integração geofísica-geológica executada por este trabalho busca correlacionar as informações obtidas a partir das análises geofísicas quali-quantitativas e o ambiente geológico mapeado da área. Este capítulo apresenta as contribuições da análise geofísica para a caracterização de áreas com maior propensão à deflagração de colapsos e subsidências baseados nas condicionantes estruturais e cobertura litológica.

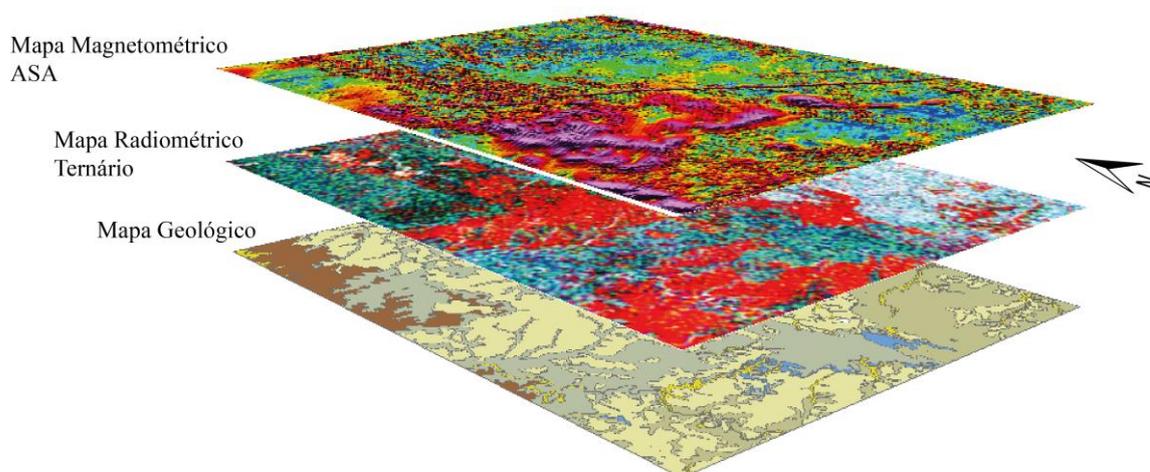


Figura 6.1 – Ilustração da análise conjunta entre os mapas geológicos e geofísicos.

6.1 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

6.1.1 Radiometria

A interpretação radiométrica visou a caracterização da cobertura da área de estudo. Todos os mapas radiométricos gerados auxiliaram a delimitação das radiofácies, principalmente a imagem ternária. Os domínios radiométricos foram correlacionados aos mapas geológicos da região e apresentaram domínios com limites similares aos contatos geológicos mapeados levando em consideração o contraste nas concentrações isotópicas das coberturas.

As regiões de médio Potássio e baixo Tório e Urânio da área de estudo possuem grande relação com os pelitos da Fm. Serra de Santa Helena e com a planície de inundação do Rio das Velhas, correspondendo a radiofácies A. Os domínios de médio a auto K e baixas concentrações de U e Th corresponderam aos domínios da Fm. Lagoa do Jacaré. Coberturas lateríticas e eluvionares apresentaram uma grande correlação aos domínios de alto Th e U e baixo K, evidenciadas pela radiofácies B. As regiões onde afloram a Fm. Serra da Saudade apresentaram grande variabilidade nas concentrações isotópicas, em geral, evidenciando relação com domínios com altas concentrações dos radioelementos na radiofácies E (Figura 6.2).

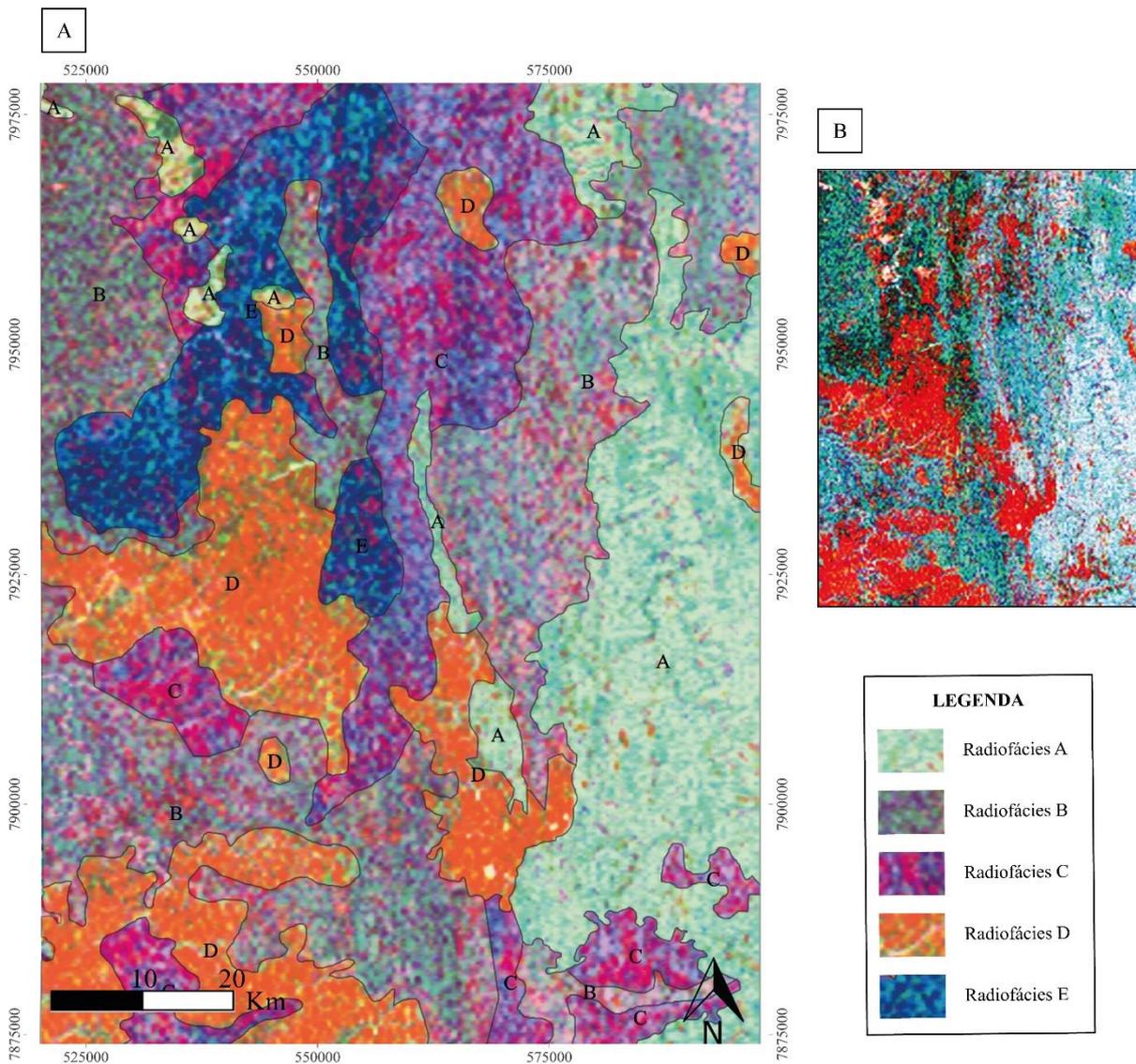


Figura 6.2 – A) Mapa de radiofácies. B) Imagem ternária

Nas regiões limítrofes Norte e Oeste da folha Curvelo com, respectivamente, as folhas Corinto e Morro da Garça as radiofácies (Tabela 5.3) contribuíram no ajuste dos contatos abruptos que existiam entre as folhas. A oeste, o contato entre as formações Serra da Saudade e Serra de Santa Helena foi ajustado utilizando as concentrações isotópicas das radiofácies B e E (Serra da Saudade) em contraste com a C (Serra de Santa Helena). A norte, o contato entre as formações Lagoa do Jacaré e Serra de Santa Helena foi ajustado a partir das radiofácies B (Lagoa do Jacaré) e A (Serra de Santa Helena) (Figura 6.3).

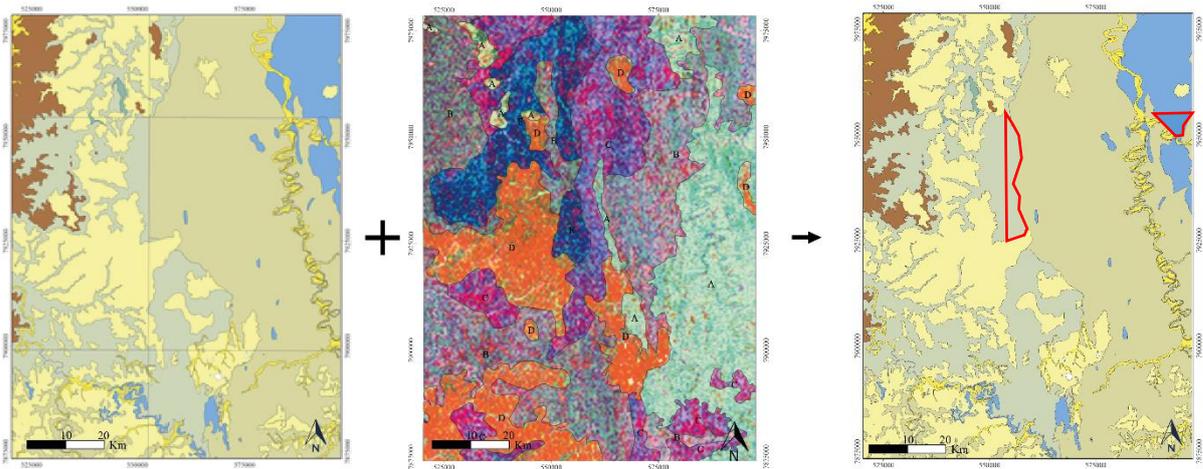


Figura 6.3 – Ajustes efetuados (em vermelho) a partir dos mapas radiométricos no mapa litológico da área de estudo.

6.1.2 Magnetometria

A análise entre os mapas magnetométricos permitiu equiparar feições ao contexto geológico da área de estudo (Figura 6.4). Os mapas de filtragem de dados auxiliaram evidenciando determinadas estruturas e contraste de resposta das rochas na crosta da área.

O mapa de campo anômalo (Figura 6.4) e o mapa de derivada vertical DZ evidenciaram uma estrutura elipsoidal relativamente grande negativa na porção centro oeste da área de estudo. O caráter negativo dessa estrutura é na verdade inverso, uma vez que esta anomalia se encontra no hemisfério sul. Outra estrutura linear dipolar de direção NW-SE é destacável na região central do mapa e pode indicar um dique não aflorante na região.

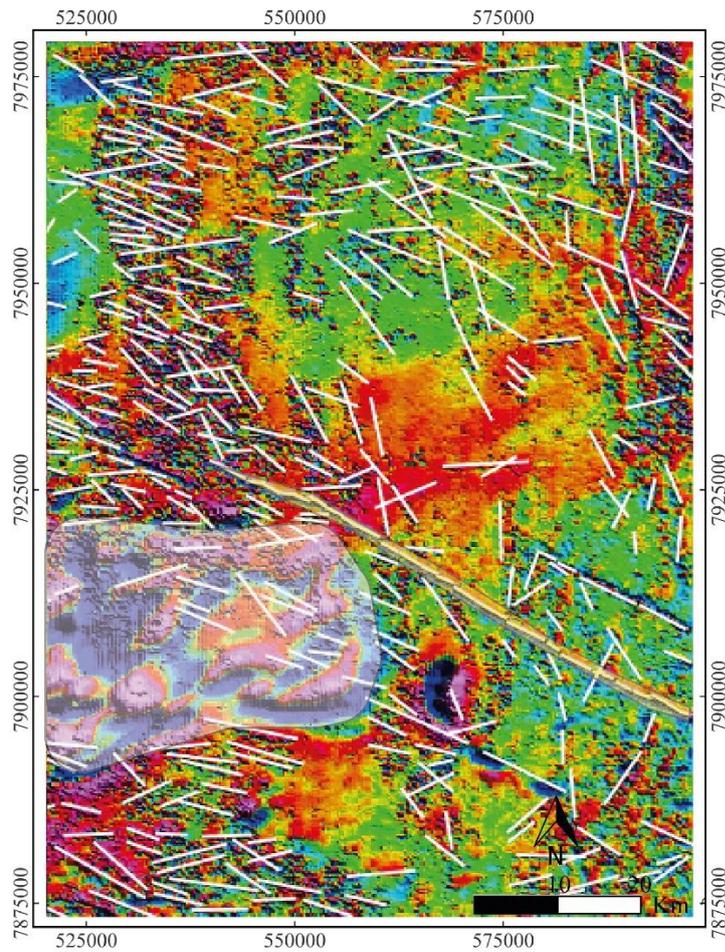


Figura 6.4 – Mapa de campo anômalo com a anomalias elipsoidal e linear destacada

Os mapas de derivada DX e DY evidenciaram estruturas de direção predominante Norte-Sul e Leste-Oeste, respectivamente. A partir desses mapas, foi possível analisar dois *trends* estruturais. A região leste da área de estudo, apresentou direções predominantemente N-S, a região oeste uma tendência NW.

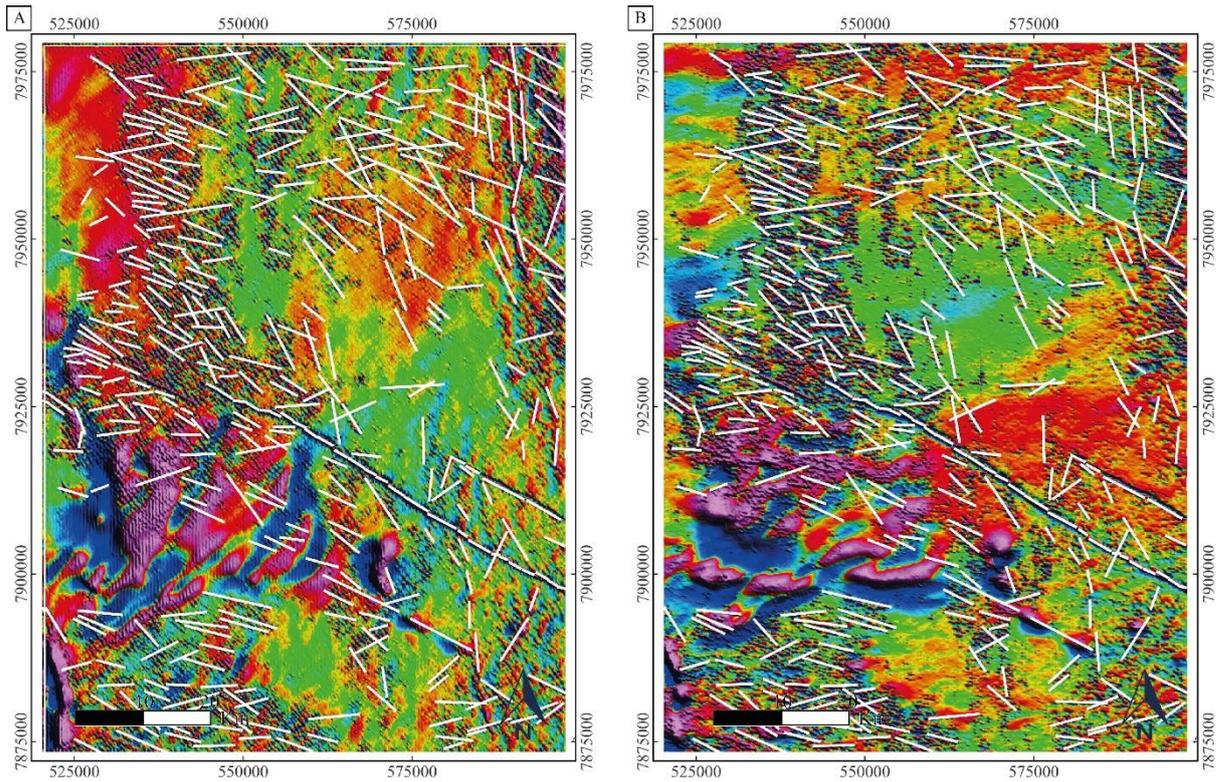


Figura 6.5 – A) Mapa de derivada horizontal DX evidenciando lineamentos com direção predominantemente N-S B) Mapa de derivada horizontal DY evidenciando lineamentos de direção predominantemente E-W.

A análise da imagem ASA possibilitou a compartimentação da área em dois domínios (Figura 6.7a), com base nas direções preferenciais dos lineamentos e das respostas magnéticas apresentadas pelas magnetofácies. O domínio morfoestrutural leste obtidos a partir da imagem, corresponde às regiões de amplitude do sinal analítico predominantemente mais baixas, o domínio oeste, por outro lado, apresenta as regiões de sinal analítico mais altos. Nota-se uma relevante semelhança entre os limites desses domínios e as regiões de contato entre as unidades Formação Serra de Santa Helena (Domínio Leste), e a formação Serra da Saudade (Domínio Oeste) (Figura 6.7b).

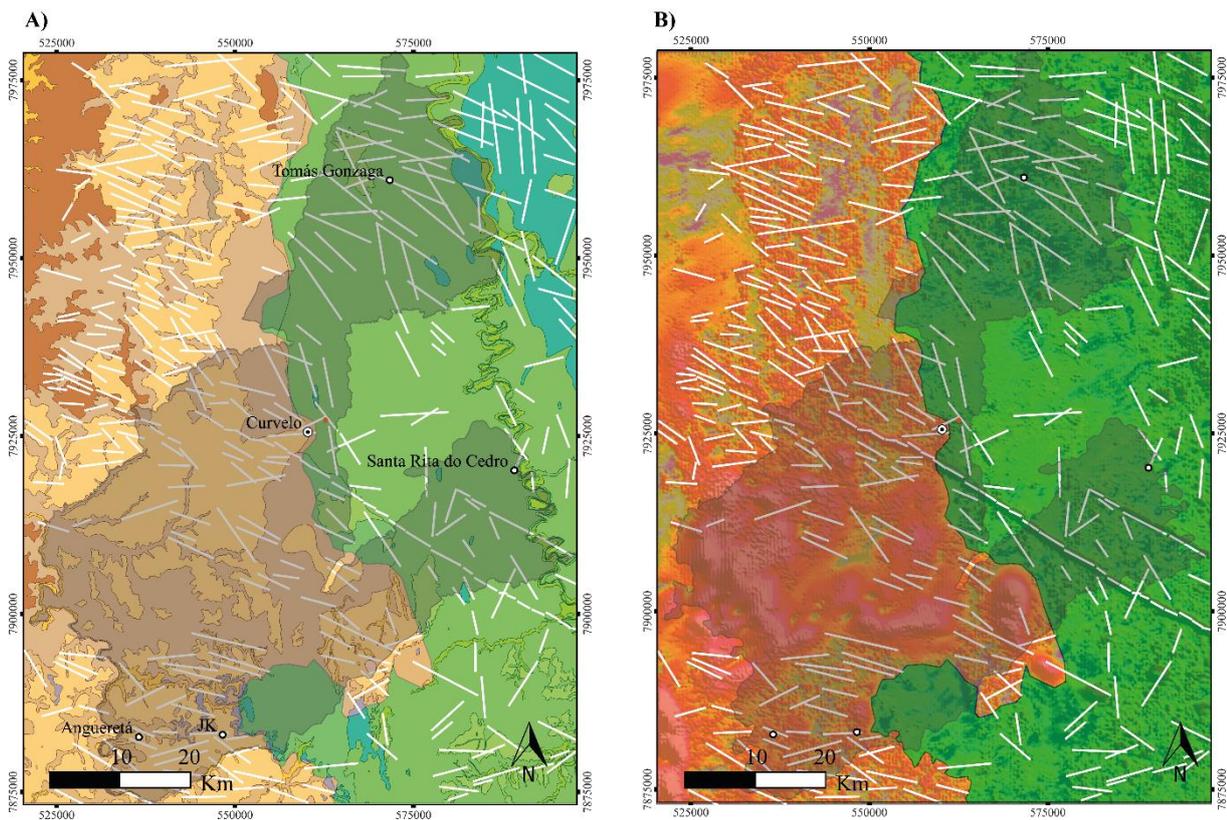


Figura 6.6 –A) Mapa geológico da área de estudo subdividido pelos domínios morfoestrutural leste e oeste. B) Mapa de ASA e seus lineamentos subdividido pelos domínios morfoestrutural leste e oeste.

6.1.3 Deconvolução de Euler

Os resultados obtidos pelo cálculo da deconvolução de Euler (Tabela 5.2) a partir dos dados de amplitude do sinal analítico demonstram que, em geral, as fontes das anomalias da região estão localizadas em profundidades rasas, não ultrapassando 1628 m. Levando em consideração os domínios morfoestrutural propostos pela análise dos mapas magnéticos, identificou-se uma considerável diferença entre as profundidades das anomalias dos domínios morfoestruturais Oeste e Leste.

Uma análise do perfil das linhas 5 deconvolução demonstra que as anomalias do domínio oeste provêm de profundidades mais rasas e as do domínio leste relativamente mais profundas (Figura 6.8). As fontes magnéticas presentes neste último domínio, podem estar relacionadas às falhas reversas de alto ângulo, identificadas por Romeiro-Silva & Zalán (2005) na borda leste do Cráton do São Francisco nas unidades do Supergrupo Espinhaço, Macaúbas e Bambuí, como impressões deixadas após a orogênese brasileira.

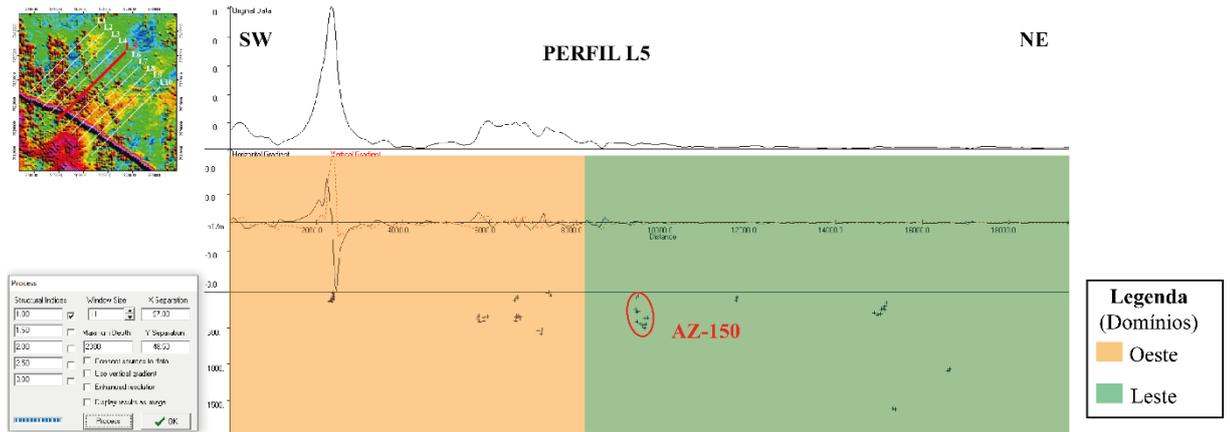


Figura 6.7 – Perfil de Deconvolução de Euler da Linha 5 distinguindo a profundidade das anomalias relacionadas ao domínio Oeste e Leste.

Dado a profundidade dessas anomalias do domínio Leste, bem como a disposição estratigráficas das unidades cratônicas, é plausível afirmar que haja um condicionamento litoestrutural para o desenvolvimento de cavidades cársticas na região de Curvelo. Como demonstrado pela Figura 6.8, existe uma considerável correlação entre os poços de bombeamento do aquífero cárstico, demonstrando a existência de condutos, com as anomalias magnéticas da região evidenciada pelo lineamento AZ-150.

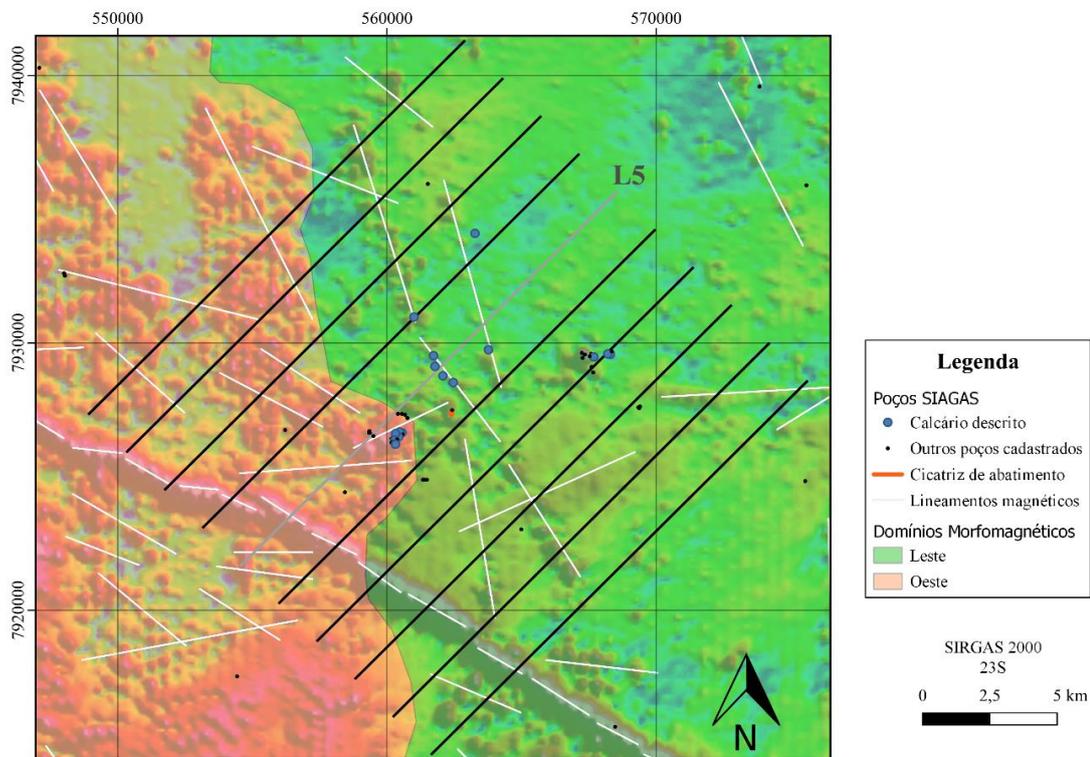


Figura 6.8 – Malha de Deconvolução de Euler demonstrando a relação entre os lineamentos magnéticos e o desenvolvimento do carste da região ao longo dessas discontinuidades.

6.2 MAPA DE ÁREAS POTENCIAIS

Este trabalho se baseou em duas condicionantes principais para a deflagração de colapsos e subsidências de cavidades em terrenos cársticos. São elas: a existência de substrato, aflorante ou não, composto de minerais solúveis e; a existência de estruturas de descontinuidade capazes de condicionar o fluxo de dissolução nesses ambientes. A partir desses fatores, com o auxílio dos dados regionais de geofísica, esse estudo propõe um mapa de áreas em potencial para deflagração de colapsos e subsidência de cavidades cársticas para a região municipal de Curvelo e imediações (Figura 6.9).

Para a elaboração desse mapa foi arbitrado uma área de influência de 1 Km de raio para os lineamentos geofísicos descritos na área de estudo, baseado na distância entre os lineamentos AZ-150 e as cicatrizes de subsidência descritas por Goes & Lana (2019), criando polígonos derivados. O *trend* dos lineamentos descritos a partir da deconvolução de Euler, foram interpretados como condicionantes da dissolução do substrato carbonático, dessa forma, foi subtraído polígonos com direções muito discrepantes ao AZ-150. Por último foram subtraídos do modelo polígonos situados sobre planícies aluviais, devido ao caráter majoritariamente superficial da drenagem dessas áreas, e polígonos relacionados a anomalia linear descrita na Figura 6.4, devido ao caráter intrusivo interpretado para esta.

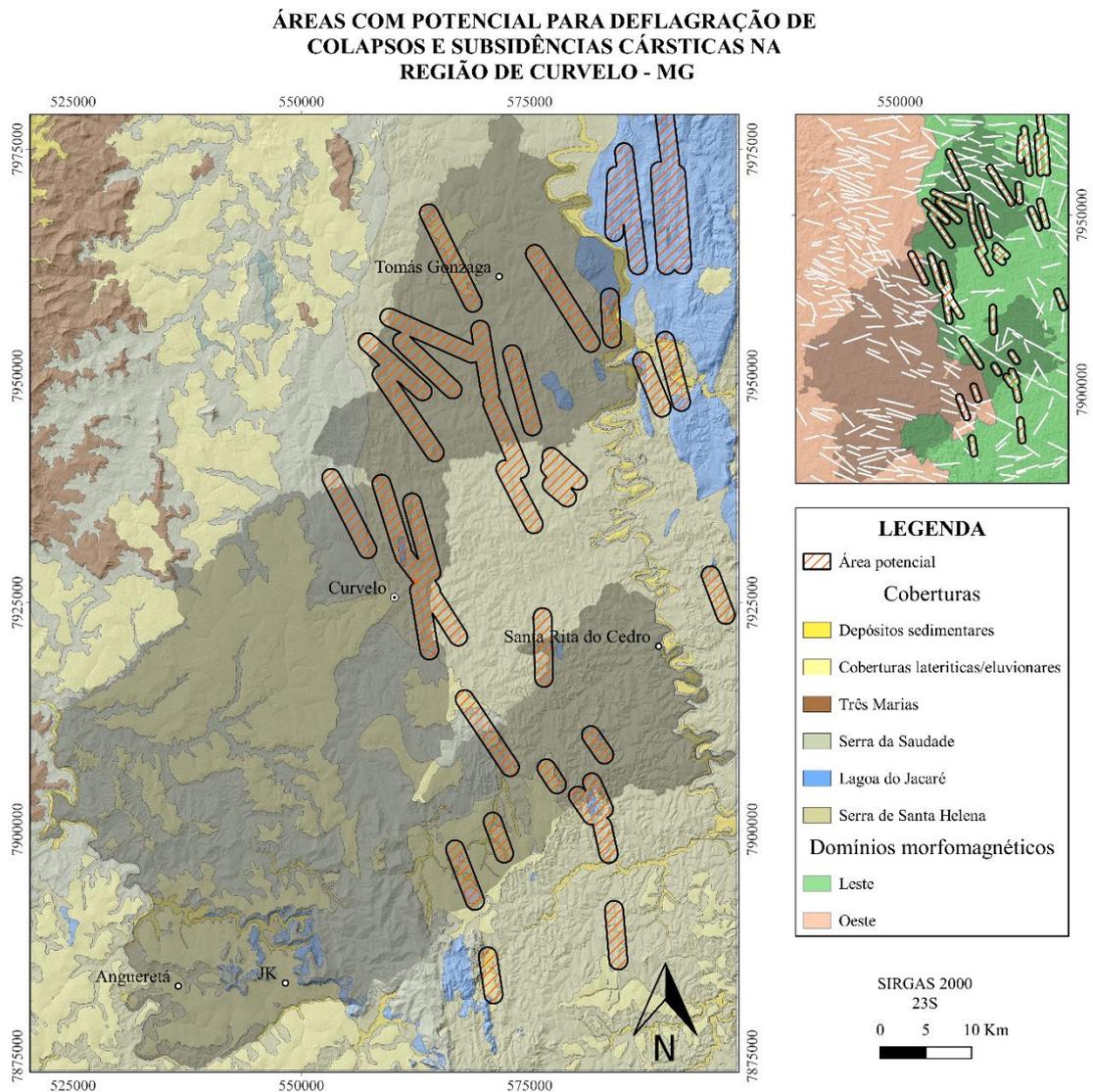


Figura 6.9 – Modelo indicativo das áreas com potencial à deflagração de colapsos e subsidências cársticas baseado em dados geofísicos regionais.

Foram delimitados, ao todo, 23 polígonos de áreas com potencial para deflagração de subsidências e colapsos. A grande maioria desses polígonos estão localizados em regiões onde afloram as rochas insolúveis da Fm. Serra de Santa Helena dado o caráter subjacente de parte do carste da região. Três polígonos se situam sobre os domínios da Fm. Lagoa do Jacaré, de natureza solúvel, e deverão apresentar dolinas de dissolução, dada a exposição aérea das rochas solúveis.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES

O número de aplicações para a geofísica vem aumentando ao longo dos anos e tem se mostrado indispensável para estudos regionais onde a geologia e a geotectônica são fatores condicionantes. Esta monografia demonstra um tipo de aplicação desta ciência até então pouco explorado, o ordenamento territorial e planejamento urbano. A geofísica aerolevantada nesse tipo de aplicação regional define áreas de interesse para que posteriormente estudos, de caráter local, validem o modelo.

Visando auxiliar tais políticas, foi possível concluir com o estudo elaborado que:

- a área municipal de Curvelo se insere completamente sobre os domínios estratigráficos do Grupo Bambuí, unidade da bacia sedimentar São Francisco e exibe duas regiões com características geofísicas e geológicas distintas, sendo uma predominantemente dominada pela Fm. Serra da Saudade e a outra dominada pela Fm. Serra de Santa Helena;
- as regiões dominadas pela Fm. Serra de Santa Helena exibem lineamentos magnéticos com uma tendência NNW-SSE, já as regiões dominadas pela Fm. Serra da Saudade apresentam lineamentos com direções próximas WNW-ESE;
- ainda que apresentando litologias solúveis expostas superficialmente (Fm. Lagoa do Jacaré), o histórico recente de eventos ligados a subsidência cárstica em Curvelo não está relacionado a esses domínios, sendo relacionado a rochas insolúveis. Tal característica, juntamente com a descrição de poços de bombeamento do aquífero cárstico da região, atribuem um caráter subjacente à grande parte do carste da região indicando a influência de outra unidade estratigráfica, a Fm. Sete Lagoas;
- a radiometria se mostrou uma importante ferramenta para a solução de inconsistências em regiões limítrofes entre folhas de mapeamento geológicos. Porém, um ajuste por sensoriamento remoto e validação de campo seriam mais condizentes com o caráter litológico e menos generalizados;
- há uma interessante correlação entre os poços de bombeamento de água e lineamentos magnéticos regionais demonstrando a influência de descontinuidades mapeadas para o desenvolvimento de condutos e zonas saturadas em água na região. A área do evento mais recente de subsidência cárstica, também se situa próximo a tais estruturas mapeadas;
- perfis de deconvolução de Euler permitiram a visualização de anomalias magnéticas em subsuperfície a partir da inversão dos dados de Amplitude do Sinal Analítico. O cálculo da inversão indicou, para a região dos perfis arbitrados pelo estudo, que as anomalias não possuíam profundidades muito grandes, sendo em média 259 m.

Ainda que de caráter regional e sem validação em campo, dado ao contexto pandêmico mundial na época de elaboração do trabalho, o trabalho propõe uma abordagem partindo de fatores condicionantes muito relevantes para o desenvolvimento e deflagração de colapsos e subsidências cársticas em regiões como a de Curvelo – MG. O autor recomenda a validação do modelo proposto em levantamentos de campo, e anseia que ele seja aperfeiçoado e criticado em estudos *a posteriori*. Levantamentos geofísicos terrestres de magnetometria, métodos elétricos e gravimetria seriam de grande valia para enriquecimento do modelo ao indicar cavidades, condutos e zonas saturadas no carste da região.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alkmim F.F., Neves B.B. de B.; Alves J.A.C. Arcabouço tectônico do Cráton do São Francisco – Uma Revisão. In: SIMPÓSIO CRÁTON DO SÃO FRANCISCO, 2, 1993, Salvador. Anais... Salvador: Sociedade Brasileira de Geologia, 1993, p.45-62.
- Alkmim F.F., Chemale Jr. F., Endo I. 1996. A deformação das coberturas proterozoicas do Cráton do São Francisco e o seu significado tectônico. *Rev. Escola de Minas*, 49:22-38.
- Alkmim, F. F. & Martins-Neto M. A. 2001. A Bacia Intracratônica do São Francisco: Arcabouço estrutural e cenários evolutivos. In: Pinto, C. & Martins-Neto, M. A. (eds.) *Bacia do São Francisco: Geologia e Recursos Naturais*. Belo Horizonte, SBG/MG, 9-30.
- Alkmim, F. F. 2004. O que faz de um craton um cráton? O Cráton do São Francisco e as revelações almeidianas ao delimitá-lo. In: Martins-Neto V., Bartorelli, A., Carneiro, C. D. R., Brito-Neves, B. B. de (org.) *Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. São Paulo, Beca, 17-35.
- Almeida, F.F.M. de. 1977. O Cráton do São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, 7(4):349-364
- Almeida-Abreu A. 1995. O Supergrupo Espinhaço da Serra do Espinhaço Meridional (Minas Gerais): O rifte, a bacia e o orógeno. *Geonomos*, 3,1-18.
- Andrade J.J.C., Silva A.D.R., Pinto L.G.R. 2019. Investigação das feições de instabilidade da Rua Mato da Lagoa e entorno, Bairro Jockey Clube, Curvelo – MG. Relatório Geofísica (Métodos Elétricos) CPRM, 42p.
- Auler A., Rubbioli E. L., Brandi R. 2001. *As Grandes Cavernas do Brasil*, Belo Horizonte, Rona Editora, 230.
- Auler, A. 1994. Hydrogeological and Hydrochemical Characterization of the Matozinhos-Pedro Leopoldo Karst, Brazil. MSc. Thesis, Western Kentucky University, 110.
- Auler, A., & Farrant, A. R. 1996. A brief introduction to karst and caves in Brazil. *Proceedings of the University of Bristol Speleological Society*, 20, 187-200.
- Bakalowicz M. 2004. The epikarst. The skin of karst In: Jones W.K., Culver D.C., Herman, J.S. (eds.) *Epikarst. Karst Waters Institute Special Publication*. Charles Town. 9: 16-22.
- Bakalowicz M. 2012. Epikarst In: White W.B., Culver D.C. (eds.) *Encyclopedia of Caves 2nd ed.*, Elsevier: 284–288.
- Barbosa M.S.C., Oliveira L.A.S. 2020. Geofísica do Quadrilátero Ferrífero. In: Castro T.A., Endo I., Gandini A. L. (eds.) *Quadrilátero Ferrífero: Avanços do conhecimento nos últimos 50 anos*. 3i Editora.: 114-141.
- Beck B. 2012. Soil Piping and Sinkholes failures. In: White, W.B. & D.C. Culver (eds.) *Encyclopedia of caves 2nd edition*. Chennai, Elsevier Academic Press. 719-723.
- Beck B.F. 2005. Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst. *American Society of Civil Engineers, Geotechnical Special Publication*, 144: 677.
- Beck, H.E., Zimmermann, N. E., McVicar, T. R., Vergopolan, N., Berg, A., & Wood, E. F. 2018. Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Nature Scientific Data*: 180214
- Bögli A. 1980. *Karst Hydrology and Physical Speleology*, Springer-Verlag, Berlin, 284
- Brookfield, M. E. 2004. *Principles of stratigraphy*. Malden, Blackwell Publishing, 352.
- Buchwaldt R., Toulkeridis T., Babinski M., Santos R., Noce C.M., Martins Neto M., Hercos, C.M. 1999. Age determination and age related provenance analysis of the proterozoic glaciation event in central eastern Brazil. *South American Symposium on Isotope Geology*, 2, Cordoba: 387-390.
- Campos, J. E. G. & Dardenne, M. A. 1997. Origem e Evolução da Bacia Sanfranciscana. *Revista Brasileira de Geociências*, 27 (3):283-294.
- CECAV - Centro Nacional De Pesquisa E Conservação De Cavernas 2018. Cadastro Nacional de Informações Espeológicas Disponível em: < <http://www.icmbio.gov.br/cecav/canie.html> Acesso em: 10 jan. 2017.
- CETEC - Fundação Centro Tecnológico De Minas Gerais. 1983. *Diagnóstico Ambiental do Estado de Minas Gerais. Série de Publicações Técnicas/SPT-010*. Belo Horizonte. 1-158.

Chiavegatto, J. R. S. 1992. Análise estratigráfica das sequencias tempestíficas da Formação Três Marias (Proterozoico Superior), na porção meridional da Bacia do São Francisco. Dissertação de Mestrado, DEGEO/Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 216.

Clima Tempo. Climatologia – Curvelo. <https://www.climatempo.com.br/climatologia/134/curvelo-mg> Acessado em 18 fev 2021.

CPRM - Centro de Pesquisa e Recursos Minerais/Serviço Geológico do Brasil. 1998. Zoneamento Ambiental da APA Carste de Lagoa Santa-MG. Belo Horizonte. 61.

D' Arrigo H.B.P. O descolamento basal do Grupo Bambuí e o alto de Sete Lagoas. 1995. 99 p. Dissertação de Mestrado – Escola de Minas. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 1995.

D' Arrigo H.B.P., Alkmim, F.F. O Alto de Sete Lagoas e sua reativação. In: Simp. Nac. Est. Tectônicos, 5, 1995, Gramado. Boletim de Resumos Expandidos... Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Geologia/ Núcleo RS – Centro de Estudos em Petrologia e Geoquímica (CPGQ-UFRGS), 1995. p.21-2

Dardenne M.A. 1978. Síntese sobre a estratigrafia do Grupo Bambuí no Brasil Central. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 30, Recife, Anais, 2: 507-610.

Dardenne M. A. 1981. Os grupos Paranoá e Bambuí na Faixa Dobrada Brasília. In: SBG/Núcleo BA, Simpósio sobre o Cráton do São Francisco, 1, Salvador, Anais, 140-157.

Durrheim R.J., Cooper R.J. (1998) EULDEP: A Program for the Euler Deconvolution of Magnetic and Gravity Data. *Computer and Geosciences*, 24, 545-550.

Gonçalves J.T.D. 2019. Integração do método geofísico de eletrorresistividade e ensaios SPT na investigação de perfis de solos da região metropolitana de Salvador (RMS). Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Bahia, Escola Politécnica, Salvador. 67.

Guerra A. T. & Guerra A. J. T. 2008. Novo dicionário geológico-geomorfológico. 6. ed., Rio de Janeiro, Bertrand Brasil, 2008. 648.

Gutiérrez F., Guerrero J., Lucha 2008. A genetic classification of sinkholes illustrated from evaporite paleokarst exposures in Spain. *Environmental Geology*, 53: 993-1006.

Gutiérrez F., Parise M., De Waele J., Jourde H. 2014. A review on natural and human-induced geohazards and impacts in karst. *Earth Science Reviews*, 138: 61-88.

Hercos C.M. 2008. Arcabouço Tectono-Estratigráfico da Bacia do São Francisco nos arredores das Serras da Água Fria e da Onça, porção centro norte do Estado de Minas Gerais. Dissertação de Mestrado, DEGEO/Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 207

IDM - INSTITUTO DE DESENVOLVIMENTO MUNICIPAL. 2008. Plano Diretor Participativo e Integrado do Território Municipal / Área Rural de Curvelo – Diagnóstico e Diretrizes para a Estruturação do Território Municipal/ Área Rural. Volume I.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). 2010. Censo 2010. [Acesso em: 20 jun. 2020]. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/curvelo/panorama>.

Jancin, M. & Clark, D.D. 1993. Subsidence-sinkhole development in light of mud infiltrate structures within interstratal karst of the coastal plain. Southeast United States. *Environmental Geology*, 22, 330–336.

Jennings, J. N., 1971. Karst; An Introduction to Systematic Geomorphology, vol. 7. Cambridge, The MIT Press, 252.

Jones W.K., Culver D. & Herman J.S. 2004 . Epikarst. Special Publication 9, Karst Water Institute, Leesburg.

Karmann I. 1994. Evolução e dinâmica atual do sistema cárstico do alto Vale do Rio Ribeira de Iguapé, sudeste do Estado de São Paulo. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, São Paulo. 274.

Kearey , Brooks M., Hill I. 2009. Geofísica de exploração. Oficina de Textos, São Paulo, 438

- Klimchouk A. 2004. Evaporite karst In: Gunn J. (eds.) *Encyclopedia of Caves and Karst Science*, New York, Fitzroy Dearborn: 343–347.
- Klimchouk A., V. Andrejchuk 2002: Karst breakdown mechanisms from observations in the gypsum caves of the Western Ukraine: implications for subsidence hazard assessment. *International Journal of Speleology*, 31: 55–88.
- Klimchouk A.B. 1995. Karst morphogenesis in the epikarstic zone. *Cave and Karst Science*, 21(2): 45–50.
- Lana, J. C., Goes, H. Levantamento de feições de instabilidade do terreno e edificações, da rua Mato da Lagoa e entorno, bairro Jóquei Clube: Curvelo, MG. [Belo Horizonte]: CPRM, 2019
- Larousse França. 2021. https://www.larousse.fr/encyclopedie/images/Relief_karstique/1002991 Acessado em 11 mar 2021.
- Lima O. N. B., Uhlein A., Britto W. 2007. Estratigrafia do Grupo Bambuí na Serra da Saudade e geologia do depósito fosfático de Cedro do Abaeté, Minas Gerais. *Revista Brasileira de Geociências*, 37: 204-215.
- Luiz J. G. & Silva L. M. C. 1995. *Geofísica de Prospecção*. Belém, Universidade Federal do Pará/CEJU 311.
- Machado M. 2010. Geodiversidade do estado de Minas Gerais. (org.) Machado M. & Silva S. F. Belo Horizonte, CPRM, 136.
- Maire R. 1981. Karst and hydrogeology synthesis. *Spelunca*, 3: 23–30.
- Mangin A. 1973. Sur la dynamiques des transferts en aquifere karstique In: *Proceedings of the 6th International Congress of Speleology* 6th International Congress of Speleology. Olomouc, 6: 157–62.
- Martins-Neto M. A. & Alkmim, F. F. 2001. Estratigrafia e evolução tectônica das bacias neoproterozoicas do Paleocôntinente São Francisco e suas margens: Registro da quebra de Rodínia e colagem de Gondwana. In: Pinto, C. & Martins-Neto, M. A. (eds.) *Bacia do São Francisco: Geologia e Recursos Naturais*. Belo Horizonte, SBG/MG, 31-54.
- Myr Projetos Sustentáveis 2017. Plano Diretor Municipal de Curvelo, Revisão – 2016/2017. *Leitura Técnica – Diagnósticos e levantamentos*, 501.
- Newton J. G. 1987. Development of sinkholes resulting from man's activities in the Eastern United States. In: *U.S. Geological Survey Circular* 968, 54.
- Okubo J., Muscente A. D., Luvizotto G. L., Uhlein G. J., Warren L. V. 2018. Phosphogenesis, aragonite fan formation and seafloor environments following the Marinoan glaciation. *Precambrian Research*, 311: 24–36.
- Parise M. 2015. Karst geo-hazards: causal factors and management issues. *Acta Carsologica*, 44/3: 401–414.
- Pedrosa Soares A.C., Noce C.M., Vidal , Monteiro R.L.B., Leonardos, O.H. 1992. Towards a new tectonic model for the Upper Proterozoic Araçuaí (SE Brazil) - West Congolian (SW Africa) Belt. *Journal of South American Earth Sciences*, 6: 33–47.
- Pedrosa Soares A.C., Vidal , Leonardos O.H., Brito-Neves, B.B. 1998. Neoproterozoic oceanic remnants in eastern Brazil: further evidence and refutation of an exclusively ensialic evolution for the Araçuaí – West Congo Orogen. *Geology* 26: 519 – 522.
- Piló L. B. 2000. Geomorfologia Cárstica. In: *Revista Brasileira de Geomorfologia* Vol 1. 1: 88-102.
- Pinho J.M.M., Ribeiro J.H., Tuller M.P., Féboli W.L., Signoreli N. Arcabouço estrutural do Grupo Bambuí na região sudeste do Cráton do São Francisco. In: *CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA*, 43, 2006, Aracajú, Anais... Aracajú: Sociedade Brasileira de Geologia, 2006. v.1, p.111
- Reid A.B., Allsop J.M., Granser H., Millet A.J., Somerton I.W. 1990. Magnetic Interpretation In Three Dimensions Using Euler Deconvolution. *Geophysics* 55, 80-91.
- Reis H.L.S., 2011. Estratigrafia e tectônica da Bacia do São Francisco na zona de emanações de gás natural do baixo Rio Indaiá (MG). *Dissertação de Mestrado, DEGEO/Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto*, 150.

- Romeiro-Silva, P.C.; Zálán, P.V. 2005. Contribuição da Sísmica de Reflexão na Determinação do Limite Oeste do Cráton do São Francisco. In: Simpósio Sobre o Cráton do São Francisco, 3. Salvador. Anais. Salvador. Sociedade Brasileira de Geologia, p.44-47. Expanded abstract.
- Salem A. E. D. & Ravat D. 2003. A combined analytic signal and Euler method (AN-EUL) for automatic interpretation of magnetic data. *Geophysics*, 68:1952-1961.
- Salles L., & Galvão P. 2020. Nova abordagem de avaliação da suscetibilidade ao colapso e subsidência de áreas cársticas: estudo de caso do município de Iraquara, Chapada Diamantina (BA), Brasil. *Águas Subterrâneas*.
- Schöll W. U., Fogaça, A. C. C. 1979. Estratigrafia da Serra do Espinhaço na região de Diamantina. In: SBG Nucleo MG, Simpósio de Geologia de Minas Gerais, 1, Diamantina, Ata, 1: 55-73.
- Souza Fº R.G. 1995. O Arcabouço Estrutural da porção externa da Faixa Aracuaí na Serra do Cabral (MG) e o contraste de estilos deformacionais entre os supergrupos Espinhaço e São Francisco. Dissertação de Mestrado, DEGEO/Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 150
- Suguio K. 1980. Rochas Sedimentares. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 499
- Telford W.M., Geldart, L., Sheriff, R.E. 1990. *Applied Geophysics*. Cambridge University Press, 2ª edição, 770.
- Travassos, L.E.P. Considerações sobre o carste da região de Cordisburgo, Minas Gerais, Brasil. Belo Horizonte: Tradição Planalto, 2010
- Sallun Filho W. Subsidência e Colapso em Terrenos Cársticos. In: Tominaga L.K., Santoro J, Amaral R. (org.). *Desastres Naturais: conhecer para prevenir*. 3ªed. Instituto Geológico, São Paulo, 2015, 99-110.
- Toledo V.L. & Lana J.C. 2019. Panorama dos desastres naturais no Brasil: Base de dados nacional do risco geológico. In: Souza I.A., Soares Jr. A.V., Amaral W.S., Machado F.B., Isler E. (eds.). *Geosudeste 2019. Anais do 16º Simpósio de Geologia do Sudeste*, Campinas, 224.
- Uhlein G.J., Uhlein A., Pereira E., Caxito F.A., Okubo J., Warren L., Sial A.N. 2019. Ediacaran paleoenvironmental changes recorded in the mixed carbonate-siliciclastic Bambuí Basin, Brazil. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 517: 39–51.
- Vieira L.C., Almeida R., Trindade R.I.V., Nogueira A.C. R., Janikian L. 2007. A Formação Sete Lagoas em sua área-tipo: fácies, estratigrafia e sistemas deposicionais. *Revista Brasileira de Geociências*, 37:168-181.
- Waltham T., Bell F., Culshaw M. 2005. Sinkholes and Subsidence: Karst and Cavernous Rocks in Engineering and Construction. Springer, 405.
- Warren L.V., Quaglio F., Riccomini C., Simoes M.G., Poire D.G., Strikis N.M., Anelli L.E., Strikis C. 2014. The puzzle assembled: Ediacaran guide fossil Cloudina reveals an old proto-Gondwana seaway. *Geology*, 42:391–394.
- White, W.B. & D.C. Culver (eds.) 2012. *Encyclopedia of caves 2nd edition*. Chennai, Elsevier Academic Press, 966.
- Williams W. 1983. The role of the subcutaneous zone in karst hydrology. *Journal of Hydrology*. 61: 45–67.
- Williams W. 2004. The epikarst: evolution of understanding. In: Jones W.K., Culver D.C., Herman J.S. (eds.) *Epikarst*. Karst Waters Institute, Special Publication. Charles Town. 9: 11-22.
- Williams, W. 2008. The role of the epikarst in karst and cave hydrogeology: a review. *International Journal of Speleology*, 37: 1-10.
- Zalán, P.V.; Romeiro-Silva, P.C. 2007. Proposta de Mudança Significativa na Coluna Estratigráfica da Bacia do São Francisco. In: Simpósio de Geologia de Sudeste, 10.; Simpósio de Geologia de Minas Gerais, 14., 2007, Diamantina. Anais... Diamantina, MG: SBG, p.79

Relatórios dos projetos de levantamentos aerogeofísicos e de mapeamento geológico utilizados no trabalho:

CODEMIG - Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais. Belo Horizonte - Curvelo – Três Marias - Área 10: Relatório Final do Levantamento e Processamento dos Dados Magnetométricos

e Gamaespectrométricos. In: Levantamento Aerogeofísico De Minas Gerais - Programa 2008/2009, Texto Técnico. [s.l.]. CODEMIG/CPRM/LASA Engenharia e Prospecções S.A. 2009. V.1. 159p. Inclui 42 mapas geofísicos em anexo. (Relatório interno)

Costa, R.D. da, Knauer L.G., Prezotti F. P. S., Fonseca H.A.M. da. Geologia e recursos minerais da folha Curvelo SE.23-Z-A-V: escala 1:100.000: estado de Minas Gerais. Belo Horizonte: CPRM, 2012. Programa Geologia do Brasil (PGB). Levantamentos Geológicos Básicos.

Kuchenbecker M., Fragoso D. G. C., Reis, H. L. S., Costa, R.D. Geologia e recursos minerais da folha Morro da Garça, SE.23-Z-A-IV: escala 1:100.000: estado de Minas Gerais. Belo Horizonte: CPRM, 2014. Programa Geologia do Brasil (PGB). Levantamentos Geológicos Básicos.

Reis, H. L. S., Costa, R.D., Prezotti F. P. S., Mahyra T., Fonseca H. A. M. da, Kuchenbecker M. Geologia e recursos minerais da folha Andrequicé, SE.23-Z-A-I: escala 1:100.000: estado de Minas Gerais. Belo Horizonte: CPRM, 2014. Programa Geologia do Brasil (PGB). Levantamentos Geológicos Básicos.

Romano A. W., Friedmann M., Ferreira M. P., Knauer L.G. Geologia e recursos minerais da folha Corinto, SE.23-Z-A-II: escala 1:100.000: estado de Minas Gerais. Belo Horizonte: CPRM, 2014. Programa Geologia do Brasil (PGB). Levantamentos Geológicos Básicos.

Tuller M. P., Ribeiro J. H., Signorelli N., Féboli W. L., Pinho J. M. M. Geologia e recursos minerais da folha Pompéu, SE.23-Z-C-I: escala 1:100.000: estado de Minas Gerais. Belo Horizonte: CPRM, 2010. Programa Geologia do Brasil (PGB). Levantamentos Geológicos Básicos.

Tuller M. P., Ribeiro J. H., Signorelli N., Féboli W. L., Pinho J. M. M. Geologia e recursos minerais da folha Sete Lagoas, SE.23-Z-C-II: escala 1:100.000: estado de Minas Gerais. Belo Horizonte: CPRM, 2010. Programa Geologia do Brasil (PGB). Levantamentos Geológicos Básicos.