

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS E MEIO AMBIENTE

**ESTUDO SOBRE OS DESLOCAMENTOS SUPERFICIAIS DOS
TALUDES DO SETOR GW DA MINA DE FE DE BRUCUTU
(QUADRILÁTERO FERRÍFERO-MG) POR MEIO DE DADOS DE
RADAR ORBITAL**

Gabrieli Santos Boulhosa

Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Campus de Rio Claro

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“Júlio de Mesquita Filho”
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Câmpus de Rio Claro

GABRIELI SANTOS BOULHOSA

ESTUDO SOBRE OS DESLOCAMENTOS SUPERFICIAIS DOS TALUDES DO SETOR
GW DA MINA DE FE DE BRUCUTU (QUADRILÁTERO FERRÍFERO-MG) POR MEIO
DE DADOS DE RADAR ORBITAL

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Geociências e Meio Ambiente.

Orientador: Marcos Eduardo Hartwig

Rio Claro - SP

2022

Boulhosa, Gabrieli Santos

B763e Estudo sobre os deslocamentos superficiais dos taludes do setor GW da mina de Fe de Brucutu (Quadrilátero Ferrífero-MG) por meio de dados de radar orbital / Gabrieli Santos Boulhosa. -- Rio Claro, 2022

114 p. : il., tabs., fotos, mapas

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro

Orientador: Marcos Eduardo Hartwig

1. Precipitação (Meteorologia). 2. Engenharia geotécnica. 3. Taludes em rocha. 4. Radar nas geociências. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

GABRIELI SANTOS BOULHOSA

ESTUDO SOBRE OS DESLOCAMENTOS SUPERFICIAIS DOS
TALUDES DO SETOR GW DA MINA DE FE DE BRUCUTU
(QUADRILÁTERO FERRÍFERO-MG) POR MEIO DE DADOS DE
RADAR ORBITAL

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de
Geociências e Ciências Exatas do Câmpus de Rio Claro, da
Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”,
como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre
em Geociências e Meio Ambiente.

Comissão Examinadora

Prof. Dr. MARCOS EDUARDO HARTWIG
CCENS / UFES/Alegre (ES)

Prof. Dr. CESAR AUGUSTO MOREIRA
IGCE / UNESP/Rio Claro (SP)

Prof. Dr. ARNALDO DE QUEIROZ DA SILVA
IG / UFPA/Belém (PA)

Conceito: Aprovado.

Rio Claro/SP, 10 de outubro de 2022

AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente ao universo e principalmente a Deus por iluminar os meus caminhos por onde andei, em especial aos meus pais que sempre acreditaram que a educação poderia mudar e transformar o rumo de nossas vidas.

Gratidão ao meu grande amor e companheiro de vida, Adam, por ser luz no meu caminho e não me deixar desistir em nenhuma parte deste trabalho. Obrigada por acreditar no meu potencial ao longo de todos esses anos e juntos conseguimos fazer um bom trabalho.

À empresa Vale S.A., pelo auxílio em todas as etapas do trabalho, por tornar possível a realização desta dissertação e pelo grande incentivo no diz respeito a pesquisa, inovação e tecnologia no âmbito dos estudos geotécnicos. Agradeço especialmente ao Gabriel Galdino, Samuel Carneiro, Eduardo Jardim, Rafaela Bressan, Leonardo Sala, Charles Brenner, Felipe Bolivar e ao Vanderlucio Brandão, pelo enorme auxílio durante todo o desenvolvimento desse trabalho.

À empresa Walm Engenharia e Hexagon, pelo auxílio de grande valia na aquisição dos dados de campo e de radar, em especial ao Eduardo Jardim que foi ponte e conexão com tantas pessoas boas e prestativas.

À Unesp por proporcionar a oportunidade de me qualificar nessa instituição renomada, em especial ao meu orientador Marcos por me auxiliar em todas as etapas desse trabalho, além da paciência e persistência para fazer esse momento se tornar real.

Ao Reinaldo pelo grande auxílio no geoprocessamento dos mapas, bem como pela amizade.

Sou grata a todos aqueles que de alguma forma influenciaram positivamente durante o desenvolvimento desse trabalho.

*“Legado não é sobre o tamanho da fogueira que você
construiu, mas quão bem você manteve os outros aquecidos”.*

Kouzes e Posner - O Legado do Líder

RESUMO

A Mina de Brucutu encontra-se na porção nordeste do Quadrilátero Ferrífero, no município de São Gonçalo do Rio Abaixo, a aproximadamente 120 km a leste de Belo Horizonte/MG. Nesse local a empresa Vale S.A. opera uma das maiores minas de minério de ferro do Brasil. O minério de ferro encontra-se alojado nos Itabiritos e corpos de hematita da Formação Cauê. Essas rochas possuem diferentes comportamentos geomecânicos, visto que, elas ocorrem em contato com rochas intrusivas e encontram-se brechadas, intensamente foliadas e fortemente intemperizadas. Os taludes das cotas 1.030 a 1.000 do setor GW da cava de Brucutu, vem registrando instabilidades nos últimos anos. O presente estudo visa analisar os deslocamentos superficiais e discutir os prováveis fatores controladores. Utilizou-se a técnica *Advanced Differential Radar Interferometry* (A-DInSAR) a partir de imagens do sensor COSMO-SkyMed em modo *StripMap* para monitorar os deslocamentos. Os períodos abrangidos para o desenvolvimento do presente trabalho foram de junho de 2018 a agosto de 2019 e junho de 2019 a novembro de 2020. As imagens utilizadas foram fornecidas e processadas pela empresa Telespazio Brasil. Foram utilizadas também ortoimagens provenientes de Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT), dados geológico-geotécnico de campo e dados pluviométricos. Utilizou-se dados de radar terrestre para ser mais uma ferramenta de análise e compreensão dos deslocamentos. Os resultados obtidos através do monitoramento A-DInSAR mostram que foram identificadas taxas de deslocamento consideráveis (até -76,3 mm/ano) no período chuvoso. As instabilidades presentes na área de estudo são condicionadas pelos seguintes fatores: 1) contato entre rochas intrusivas (IN) e itabirito friável (IF); 2) atitude desfavorável da foliação; e 3) índices pluviométricos elevados que produzem o desmantelamento (erosão) da face dos taludes.

Palavras-chave: Precipitação, instabilidades, taludes de escavação.

ABSTRACT

The Brucutu mine is in the northeast portion of the Iron Quadrangle, in the municipality of São Gonçalo do Rio Abaixo, approximately 120 km east of Belo Horizonte/MG. Here Vale S.A. operates one of the largest iron ore mines in Brazil. The iron ore is hosted in Itabirites and hematite bodies of the Cauê Formation. These rocks have different geomechanical behavior, since they occur in contact with intrusive rocks and are brecciated, intensely foliated, and strongly weathered. The slopes of the 1,030 to 1,000 levels of the GW sector of the Brucutu pit have been showing instability in recent years. The present study aims to analyse the surface displacements and discuss the probable controlling factors. The Advanced Differential Radar Interferometry (A-DInSAR) technique from COSMO-SkyMed sensor images in StripMap mode was used to monitor the displacements. The periods covered for the development of this work were from June 2018 to August 2019 and June 2019 to November 2020. The images used were provided and processed by the company Telespazio Brasil. Also used were ortho-images from Unmanned Aerial Vehicle (UAV), geological-geotechnical field data and rainfall data. Ground radar data was used to be another tool for analysis and understanding of the displacements. The results obtained through A-DInSAR monitoring show that considerable displacement rates (up to -76.3 mm/year) were identified in the rainy season. The instabilities present in the study area are conditioned by the following factors: 1) contact between intrusive rocks (IN) and friable itabirite (IF); 2) unfavourable foliation attitude; and 3) high rainfall rates that produce the dismantling (erosion) of the slope face.

Keywords: Rainfall, slope instabilities, mine slopes.

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANM	Agência Nacional de Mineração
A-DInSAR	<i>Advanced Differential SAR Interferometry</i>
CSK	<i>COSMO-SkyMed</i>
Cwa	Clima subtropical de inverno seco e verão quente
DInSAR	<i>Differential SAR Interferometry</i>
ESA	<i>European Space Agency</i>
GW	Gralhos West
InSAR	<i>SAR Interferometry</i>
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
ISRM	<i>International Society For Rock Mechanics</i>
IUGS	<i>International Union of Geological Sciences</i>
LOS	<i>Line-of-sight</i>
MDE	Modelo Digital de Elevação
MME	Ministério de Minas e Energia
PS	<i>Persistent Scatterer</i>
PSI	<i>Persistent Scatterer Interferometry</i>
PSInSAR	Persistent Scatterer Interferometry Synthetic Aperture Radar
QFe	Quadrilátero Ferrífero
RADAR	<i>Radio Detection and Ranging</i>
RMR	<i>Rock Mass Rating</i>
ROM	<i>Run of Mine</i>
SBAS	<i>Small Baseline Subset</i>
SL	<i>SpotLight</i>
SM	<i>StripMap</i>
SC	<i>ScanSAR</i>
SAR	<i>Synthetic Aperture Radar</i>
UTM	Universal Transversa de Mercator

VANT
WebGIS

Veículo Aéreo Não Tripulado
Web Geographical Information System

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Espectro eletromagnético (porção superior) e nomenclatura das bandas de radar (porção inferior). Fonte: Adaptado de Dallemand et al. (1993).	21
Figura 2. Transmitância atmosférica para as principais bandas de radar. Fonte: Adaptado de Carver et al. (1985).	22
Figura 3. Propagação da radiação eletromagnética. O imageamento por radar explora o campo elétrico (E) do espectro eletromagnético. Fonte: Meneses et al. (2012).	22
Figura 4. Geometria de imageamento do sistema radar de visada lateral. Fonte: Adaptado de Lowman et al. (1987).	24
Figura 5. Geometria de imageamento orbital ascendente e descendente. Fonte: TRE Altamira, (2021).	25
Figura 6. Principais modos de operação dos radares imageadores orbitais: (a) StripMap, (b) ScanSAR e (c) Spotlight. Fonte: Adaptado de Moreira et al. (2013).	25
Figura 7. Diferentes tipos de distorções geométricas em imagens de radar. Fonte: Adaptado de DARES, (2021).	27
Figura 8. Representação gráfica da fase (ângulo que o vetor faz com o eixo horizontal). Fonte: Adaptado de ESA (2007).	28
Figura 9. Geometria de aquisição InSAR. Fonte: Paradella et al., (2021).	29
Figura 10. Comportamento da fase para um pixel com alvos distribuídos (a) e com um alvo persistente (b). Os gráficos abaixo mostram simulações de 100 iterações do valor de fase. Notar que em (a) ocorre dispersão no valor da fase e em (b) o oposto (estabilidade temporal). Fonte: Adaptado de Hooper et al., (2007).	33
Figura 11. Exemplo de configuração de linha de base em relação a imagem mestre em um processamento PSI. Fonte: PARADELLA et al., (2021).	34
Figura 12. Ilustração das componentes de fase de um espalhador persistente em relação a imagem mestre. Fonte: PARADELLA et al., (2015a).	35
Figura 13. Rede de interferogramas gerados a partir de 33 imagens do satélite TerraSAR-X usada na técnica SBAS. Fonte: PARADELLA et al. (2021).	36

Figura 14. Precipitação média mensal e dias chuvosos de acordo com as normais climatológicas da estação João Monlevade (1990 – 2010). Fonte: INMET (2019).	38
Figura 15. Modelo digital de elevação, com enfoque ao pronunciado relevo do Quadrilátero Ferrífero e indicação da mina de Brucutu (amarelo). Fonte: Adaptado de Casagrande, (2018)...	39
Figura 16. Mapa hidrogeológico do Quadrilátero Ferrífero e indicação da mina de Brucutu (preto e vermelho). Modificado de Dorr (1969), Beato et al. (2005), Mourão (2007), Endo et al. (2019).	40
Figura 17. Mapa geológico simplificado do Quadrilátero Ferrífero e indicação da mina de Brucutu (preto e vermelho). Modificado de Endo et al. (2019a).	42
Figura 18. Coluna Estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero (Endo et al. 2019b). Fonte: Castro et al., (2020).	46
Figura 19. Mapa esquemático da articulação dos sistemas de nappes do Quadrilátero Ferrífero com destaque para o Sinclinal Gandarela, onde está situada a mina de Brucutu. Fonte: Adaptado de Castro et al., (2020).	32
Figura 20. Modelo evolutivo para a região do sinclinal Gandarela proposto por Endo et al. (2004). Sendo hrr: corpos de hematita ricos em Ferro (> 64 %). Fonte: Adaptado Oliveira et al. (2005). 33	
Figura 21. Mapa de localização da área de estudo no âmbito do Quadrilátero Ferrífero. Fonte: Vale S.A. (2018).	34
Figura 22. Visão panorâmica aérea com visada de SE para NW da mina de Brucutu na data de 24/05/2019. Fonte: Vale S.A., (2019).	35
Figura 23. Mapa dos setores da mina de Brucutu, com indicação da área de estudo (vermelho): EX (Extremo Oeste), GN (Gralhos Norte), GW (Gralhos West), GS (Gralhos Sul), EL (Extremo Leste), VL (Vargem da Lua), ES (Extremo Sul), CI (Centro Interno) e S2.....	36
Figura 24. Empilhamento estratigráfico das unidades aflorantes na mina de Brucutu. Fonte: Vale S.A., (2019).	38
Figura 25. Mapa litológico da cava da mina de Brucutu, com indicação da área de estudo e perfil N-S mostrado na Figura 26 (linha tracejada amarela). Fonte: Walm, (2021).	39
Figura 26. Seção geológica N-S da mina de Brucutu. Fonte: Adaptado de ANGELI, (2011).....	40
Figura 27. Estereogramas de tectonitos “S” e “L” na cava da mina de Brucutu: A – Acamamento, N=617, Máx. 030/20 (9,41%), Bc=010/83 (eixo do cone); B – Xistosidade S2, N=202, Máx. 091/26	

(23,07%); C – Eixos de dobra B2, N=121, Máx. 257/09 (16,80%); D – Lineação de intersecção L2, N=87, Máx. 076/15 (35,76%); E – Lineação mineral, N=64, Máx. 0050/17 (56,75%). Fonte: Endo et al., (2008).....	41
Figura 28. Exemplos de foliação observados na cava da mina de Brucutu: A) Xistosidade na intrusiva, formada por minerais micáceos; B) Lente de quartzo no itabirito friável; C) Foliação milonítica na brecha friável; e D) Xistosidade no quartzo-muscovita xisto. Fonte: Walm, (2021).	42
Figura 29. Mapa de medidas de foliação na área da cava da mina de Brucutu, com destaque para a área de estudo. Fonte: Adaptado de Walm, (2021).	43
Figura 30. Exemplos de lineação de estiramento mineral observadas na cava da mina de Brucutu: A) alinhamento preferencial dos cristais de specularita no itabirito compacto; B) estiramento e alinhamento preferencial dos cristais de pseudomorfos de anfibólio nos itabiritos anfibolíticos. Fonte: Walm, (2021).	44
Figura 31. Mapa de distribuição das lineações de estiramento mineral, com destaque para a área de estudo. Fonte: Adaptado de Walm, (2021).....	44
Figura 32. Estereograma dos pólos de fraturas identificadas na cava da mina de Brucutu (Diagrama Schmidt-Lambert). Fonte: Adaptado de Walm, (2021).....	45
Figura 33. Mapa de classes geomecânicas para a cava da mina de Brucutu, com destaque para a área de estudo. Fonte: Adaptado de Walm, (2021).	46
Figura 34. Mapa potenciométrico da mina de Brucutu. Fonte: Adaptado de MDGEO, (2021). ..	50
Figura 35. Perfil vertical do nível d'água da formação ferrífera na mina de Brucutu, conforme indicado na figura anterior. Fonte: Adaptado de MDGEO, (2021).....	51
Figura 36. Footprint das imagens stripmap em órbitas ascendente e descendente para a mina de Brucutu, com indicação dos ângulos de incidência. Fonte: Autor, (2021).....	53
Figura 37. Sistema de classificação geomecânica utilizada na mina de Brucutu. Fonte: Vale, (2019).	54
Figura 38. Ortoimagem da área de estudo (taludes entre as cotas 1030 a 1000 do setor GW) em 05 de agosto de 2019 (a) e disposição dos PS com destaque para área anômala (b).	57
Figura 39. Gráfico de deslocamento (mm) x tempo para os PS na área de estudo.	58

Figura 40. Ortoimagem da área de estudo (taludes entre as cotas 1030 a 1000 do setor GW) em novembro de 2020 (a) e disposição dos PS com destaque para área anômala (b).	59
Figura 41. Pluviometria da estação BRUPL001 da mina de Brucutu referente ao período de junho de 2018 a agosto de 2019.	60
Figura 42. Pluviometria da estação BRUPL001 da mina de Brucutu referente ao período de junho de 2019 a novembro de 2020.....	61
Figura 43. Mapa de Anomalias Geotécnicas da região do GW da mina de Brucutu.	62
Figura 44. Condições dos taludes em setembro/2020, com destaque para a ruptura plano-circular e trincas no topo da berma.....	63
Figura 45. Imagens de drone mostrando a evolução dos taludes de agosto de 2019 a novembro de 2020 na região GW da mina de Brucutu.	64
Figura 46. Mapa geológico da mina de Brucutu, com destaque para área de estudo.....	65
Figura 47. Disposição superficial do Itabirito friável (IF) na cava Brucutu, com destaque para a área de estudo em amarelo.....	66
Figura 48. Itabirito friável com resistência muito branda inferior (R1-) (a) e grau de alteração de rocha completamente alterada (W5) (b).	67
Figura 49. Disposição superficial das rochas metabásicas na cava Brucutu, com destaque para a área de estudo.	68
Figura 50. Sill de intrusiva metabásica, de coloração bege, “dobrado” (região do EX) (a) e Amostra de mão de rocha metabásica alterada (b).....	68
Figura 51. Rocha com coloração cinza-azulada clara a lilás, intensamente intemperizada, proeminentemente xistosa (banco 1040 da região EX) (a) e Amostra de mão (b).....	69
Figura 52. Sill decamétrico de IN foliada (banco 1010 da região GW) (a) e Dique métrico foliado de IN (banco 1030 da região EX) (b).	70
Figura 53. Disposição superficial da brecha friável (BF) na cava Brucutu, com destaque para a área de estudo.	71
Figura 54. Talude composto por brecha friável (BF), de resistência R1- e grau de alteração W5 (banco 1050 da região GN) (a) e detalhe para a foliação milonítica da rocha (b).....	72
Figura 55. Domínios estruturais para cava Brucutu, com destaque para a área de estudo.....	73
Figura 56. Diagrama Estereográfico (Fisher) – Foliação pertencente ao domínio I.	73

Figura 57. Diagrama Estereográfico (Fisher) – Família de fraturas pertencente ao domínio I.....	74
Figura 58. Mapa de deslocamento do flanco norte da mina de Brucutu obtido a partir do radar terrestre (a), com destaque para a anomalia geotécnica do setor GW (b).	75
Figura 59. Gráfico de deslocamento da anomalia EXGW_02_0A3_2 ao longo do tempo.....	76
Figura 60. Gráfico de velocidade da anomalia EXGW_02_0A3_2 ao longo do tempo.	76
Figura 61. Integração dos dados litológicos, estruturais, de surgências e do radar orbital na área de estudo.....	79
Figura 62. Seção geológica NW-SE, conforme indicado na figura anterior.	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Sistema de classificação e descrição do grau de intemperismo de maciços rochosos. Fonte: ISRM, (1978).	55
Tabela 2. Estatística dos dados de taxa de deslocamento da área de estudo para o período de junho 2018 a agosto 2019.	56
Tabela 3. Estatística dos dados de taxa de deslocamento da área de estudo para o período de junho de 2019 a novembro de 2020.	59

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	18
1.1 Justificativa.....	19
1.2 Objetivos.....	20
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1 Imageamento SAR.....	20
2.1.1 Geometria de Imageamento.....	23
2.1.2 Modos de operação dos imageadores de radar orbitais	25
2.1.3 A imagem de radar	26
2.2 Princípios da Interferometria de Radar.....	27
2.2.1 Geometria de aquisição InSAR	28
2.3 Interferometria de radar	29
2.3.1 Descorrelação	30
2.3.2 Coerência Interferométrica	31
2.3.3 Interferometria Diferencial SAR (DInSAR)	31
2.4 Interferometria de radar de Abertura Sintética Diferencial Avançada (A-DInSAR)	32
2.4.1 Interferometria de Radar por Espalhadores Persistentes (PSI).....	32
2.4.2 <i>Small baseline subset</i> (SBAS).....	36
3. O QUADRILÁTERO FERRÍFERO	37
3.1 Aspectos fisiográficos	37
3.1.1 Clima	37
3.1.2 Relevô.....	38
3.1.3 Hidrogeologia	39

3.2 Geologia	41
3.2.1 Estratigrafia	41
3.2.2 Arcabouço estrutural.....	47
4. A MINA DE FE DE BRUCUTU	34
4.1 Localização, acessos e histórico	34
4.2 Aspectos geológicos e estruturais.....	36
4.3 Aspectos geomecânicos.....	45
4.4 Aspectos hidrogeológicos.....	46
5. MATERIAIS E MÉTODOS.....	52
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	56
6.1 Dados de deslocamento - A-DInSAR.....	56
6.1.1 Período de junho 2018 a agosto 2019.....	56
6.1.2 Período de junho de 2019 a novembro de 2020	58
6.2 Dados pluviométricos.....	60
6.3 Sobrevoos de VANT e inspeção geotécnica de campo.....	61
6.4 Dados geológicos e geomecânicos	64
6.5 Dados estruturais	72
6.6 Dados de deslocamento - Radar terrestre	74
6.7 Correlação dos resultados e hipóteses sobre as instabilidades	77
7. CONCLUSÕES	80
REFERÊNCIAS	81

1. INTRODUÇÃO

A indústria da mineração ocupa uma posição de destaque na economia brasileira. Em 2019, as substâncias minerais da classe dos metálicos responderam por cerca de 80% do valor total da produção mineral brasileira, com destaque para o minério de ferro com 72,8% de participação, cuja produção está concentrada nos estados de Minas Gerais e Pará, segundo a Agência Nacional de Mineração (ANM, 2020). De acordo com o Ministério de Minas e Energia (MME, 2020), o país possui cerca de 19,8% das reservas mundiais de minério de ferro, com produção de aproximadamente 342 milhões de toneladas ao ano, que correspondeu a R\$ 138,7 bilhões de faturamento para a economia brasileira. Desse montante, a mineradora Vale S.A. foi responsável por cerca de 72% da produção total de minério de ferro no país, sendo considerada a maior produtora de minério de ferro do Brasil e a terceira maior do mundo.

Em uma mina a céu aberto um dos componentes essenciais para o desenvolvimento da lavra são os taludes. A geologia da jazida define a geometria, extensão e profundidade da lavra. O ganho econômico se aplica quando a extração do minério é eficiente, ou seja, quando o volume de estéril é o menor possível. Isso significa que deve haver uma boa gestão da geometria dos taludes da cava durante a vida útil da mina. Contudo, os materiais escavados em uma mina a céu aberto possuem grande heterogeneidade mecânica e estrutural, e, conseqüentemente, isso afeta a estabilidade dos taludes.

Nesse contexto, a instrumentação de taludes de mineração é importante para se verificar o comportamento do maciço dentro dos limites previstos. Além disso, ela permite monitorar a evolução dos movimentos superficiais. Finalmente, os dados de instrumentação possibilitam estabelecer bases para reavaliações dos critérios adotados no planejamento de mina e formular diretrizes para eventuais intervenções nos taludes potencialmente instáveis nas diferentes frentes de lavra.

A motivação do presente estudo se baseia no fato de dar maior previsibilidade às instabilidades geotécnicas nos taludes de mina. O setor GW da mina de Brucutu registra instabilizações recorrentes, podendo impactar o plano de lavra, levando a um aumento nos custos operacionais.

A mineradora Vale S.A. possui na mina de Brucutu um sistema de monitoramento geotécnico que inclui diversos instrumentos. Embora as técnicas tradicionais de monitoramento

geotécnico de taludes possuam elevada precisão, muitas vezes elas não são capazes de cobrir grandes áreas com densidades de medidas adequadas, tampouco, de identificar previamente, áreas com comportamento anômalo. Nesse sentido, a tecnologia de Interferometria por Radar de Abertura Sintética (InSAR), que utiliza a informação de fase, proporcional à distância sensor-alvo de imagens de radar orbital adquiridas em diferentes épocas sobre uma mesma área, propicia uma visão sinóptica da distribuição e do estado de atividade de deslocamentos sobre vastas áreas (ROSEN et al. 2000; BURGMANN et al. 2000; MOSCONI et al. 2010; RAUCOULES et al. 2003; DEHLS, 2006).

Nas últimas décadas, as tecnologias de detecção remota de deslocamentos da superfície terrestre, tiveram um avanço significativo, e têm sido utilizadas para o monitoramento de taludes de mineração no mundo todo (JUNG et al., 2007; PERSKI et al., 2009; NG et al., 2010; YANG et al., 2010; NG et al., 2012; HARTWIG et al., 2013; MURA et al., 2014; PINTO et al., 2015; PARADELLA et al., 2015a; HARTWIG, 2016; YAOLONG et al. 2019; YANG et al. 2020; MACCIOTTA e HENDRY, 2021).

A tecnologia InSAR compreende duas abordagens principais: (i) Interferometria SAR Diferencial (DInSAR - *Differential SAR Interferometry*) (MASSONNET e FEIGL, 1998) e (ii) A-DInSAR (*Advanced-Differential Interferometric SAR*) ou *InSAR Time Series*, que compreende dois métodos principais: PSI (*Persistent Scatterer Interferometry*) (FERRETTI et al., 2001) e SBAS (*Small Baseline Subset*) (BERARDINO et al. 2003). No presente estudo foi utilizada uma variante da tecnologia PSI.

1.1 Justificativa

A tecnologia InSAR vem sendo muito empregada mundo afora para o monitoramento de taludes, e tem se mostrado uma técnica muito confiável e útil para a detecção remota de deslocamentos superficiais. Além disso, apresenta a grande vantagem de monitorar grandes áreas com grande densidade de medidas e precisão, tendo em vista as dificuldades operacionais e os custos para se manter sob vigilância estruturas geotécnicas a partir de métodos de monitoramento convencionais. Finalmente, a técnica possibilita a identificação prévia de áreas com comportamento anômalo, e que não poderiam ser identificadas de outra maneira.

Diante disso, a aplicação de soluções que permitam a otimização de exploração de recursos minerais e a redução de riscos se faz necessária. No Brasil, contudo, a utilização desta tecnologia ainda é muito recente, sendo ainda muito escassos trabalhos sobre o tema (HARTWIG et al. 2013; PINTO et al. 2015; PARADELLA et al. 2015b; HARTWIG, 2016).

1.2 Objetivos

O objetivo principal desta pesquisa é analisar os dados de deslocamento superficial obtidos pela tecnologia PSI e discutir os prováveis fatores controladores das instabilidades no setor GW da mina de Brucutu.

Os objetivos específicos são: analisar e correlacionar os dados de deslocamento orbital (PSI) com os dados geológicos, geotécnicos, estruturais, hidrogeológicos, pluviométricos. Validar os dados de deslocamento obtidos a partir de dados *in situ*.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O texto a seguir está dividido em quatro partes: 1) imageamento por radar orbital; 2) princípios da interferometria de radar; 3) interferometria de radar diferencial; e 4) interferometria de radar avançada (séries temporais).

2.1 Imageamento SAR

O termo Radar (*Radio Detection And Ranging*) é usado de forma genérica para classificar os sistemas que trabalham na frequência das microondas (0,3 GHz a 30 GHz) do espectro eletromagnético (Figura 1). Diferentemente dos sistemas de sensoriamento remoto óptico, que adquirem imagens em posição nadir, os radares imageadores exibem visada lateral oblíqua e registram a informação total da radiação eletromagnética, que compreende a amplitude, fase e polarização da onda. Além disso, o radar é um sistema de imageamento coerente, que envia pulsos regulares de microondas e registra uma parcela da radiação retroespalhada pela superfície (LEWIS e HENDERSON, 1998).

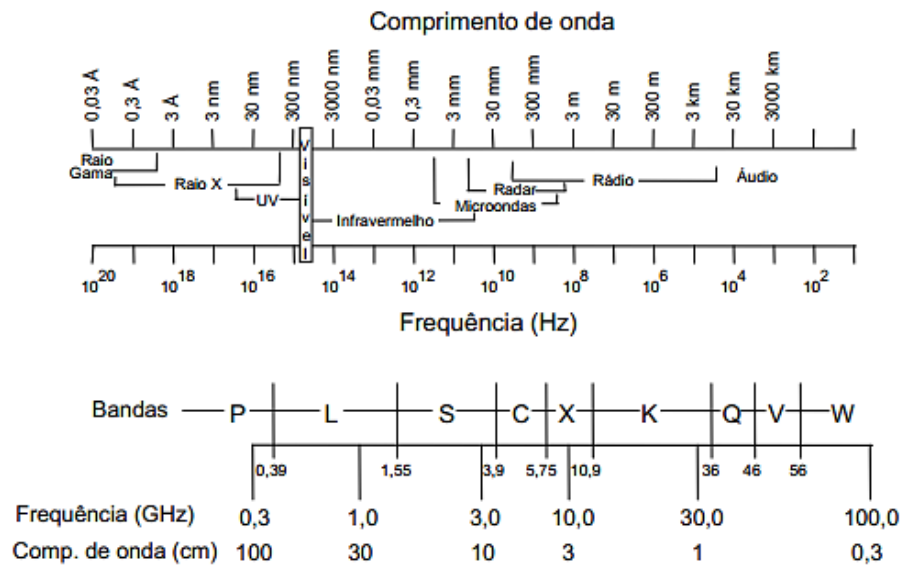


Figura 1. Espectro eletromagnético (porção superior) e nomenclatura das bandas de radar (porção inferior). Fonte: Adaptado de Dallemand et al. (1993).

Como observado na Figura 1, o espectro na faixa de microondas apresenta comprimento de onda maior do que a faixa do visível. Isto associado ao fato dos sistemas radares emitirem sua própria radiação (sistemas ativos) gera vantagens na detecção remota na faixa das microondas, pois o sinal independe das condições de iluminação e consegue penetrar nuvens (COLESANTI e WASOWSKI, 2006). A banda L possui maior penetração nos alvos, sendo menos afetada por processos de absorção e espalhamento ao trafegar pela atmosfera terrestre (ULABY et al., 1986) (Figura 2).

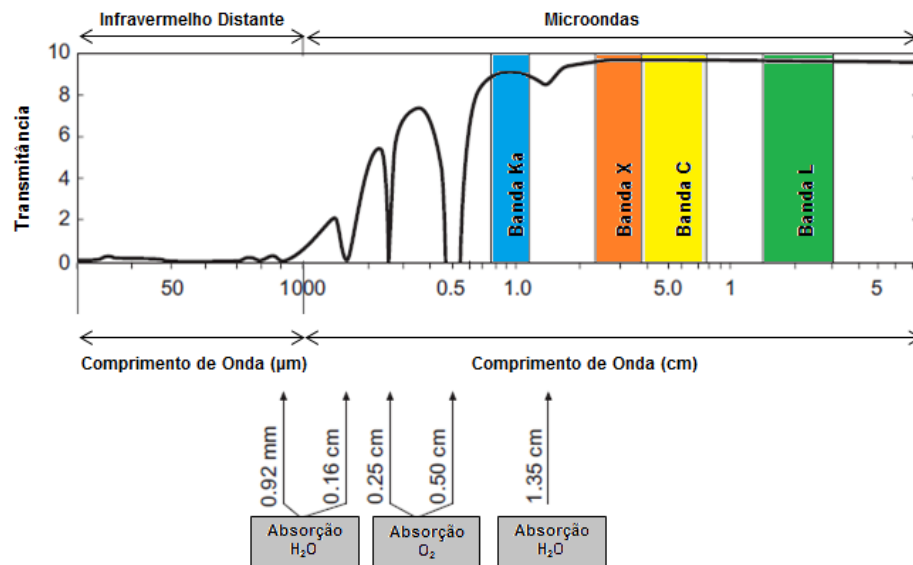


Figura 2. Transmitância atmosférica para as principais bandas de radar. Fonte: Adaptado de Carver et al. (1985).

Os radares podem emitir o feixe de micro-ondas com polarizações definidas, isso demonstra uma particularidade importante, visto que, fundamentalmente, a polarização descreve o plano de orientação de vibração do campo elétrico. As antenas de radares imageadores utilizam radiação polarizada nas direções horizontal e vertical, tanto na transmissão quanto na recepção (Figura 3). Os sistemas radares podem operar em diversos estados de polarização, tais como: HH (radiação emitida e recebida horizontalmente); VV (radiação emitida e recebida verticalmente); HV (radiação emitida horizontalmente e recebida verticalmente); VH (radiação emitida verticalmente e recebida horizontalmente) (ANDRADE et al., 2007).

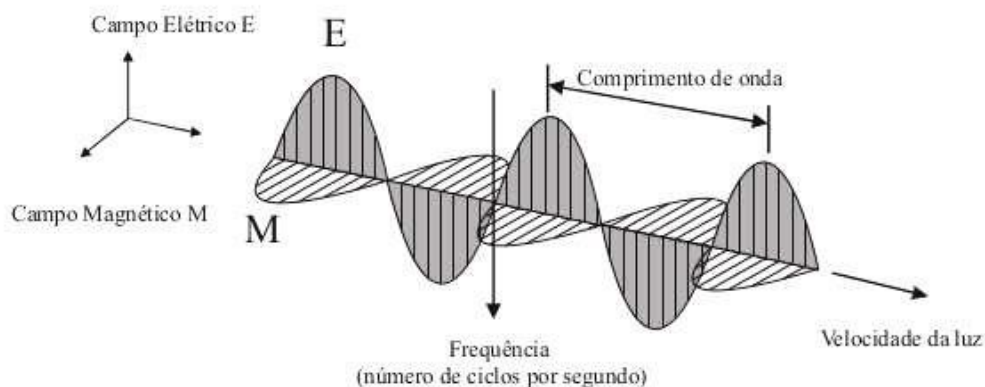


Figura 3. Propagação da radiação eletromagnética. O imageamento por radar explora o campo elétrico (E) do espectro eletromagnético. Fonte: Meneses et al. (2012).

2.1.1 Geometria de Imageamento

Os radares imageadores operam com visada lateral oblíqua e emitem uma série de pulsos coerentes de micro-ondas a partir de uma antena fixa em uma faixa de terreno paralela à sua trajetória (TREVETT, 1986; WOODHOUSE, 2006). A Figura 4 mostra os principais parâmetros geométricos que definem a geometria de imageamento por radar orbital:

- Ângulo de depressão - complementar ao ângulo de visada;
- Ângulo de visada - medido no sensor entre a linha de visada da onda e a vertical;
- Ângulo de incidência (θ) - formado entre a vertical do lugar e a direção do feixe de iluminação de radar;
- Ângulo azimutal - ângulo formado entre a direção de voo e o apontamento da antena, no plano horizontal;
- Direção em alcance (*range*) - direção horizontal oblíqua a direção de voo da plataforma;
- Direção em azimute - direção horizontal paralela à linha de voo da plataforma;
- Alcance no terreno (*ground range*) - distância sensor-alvo medida no terreno;
- Faixa de imageamento (*swath*) - largura total do terreno imageado;
- H – altura da plataforma.

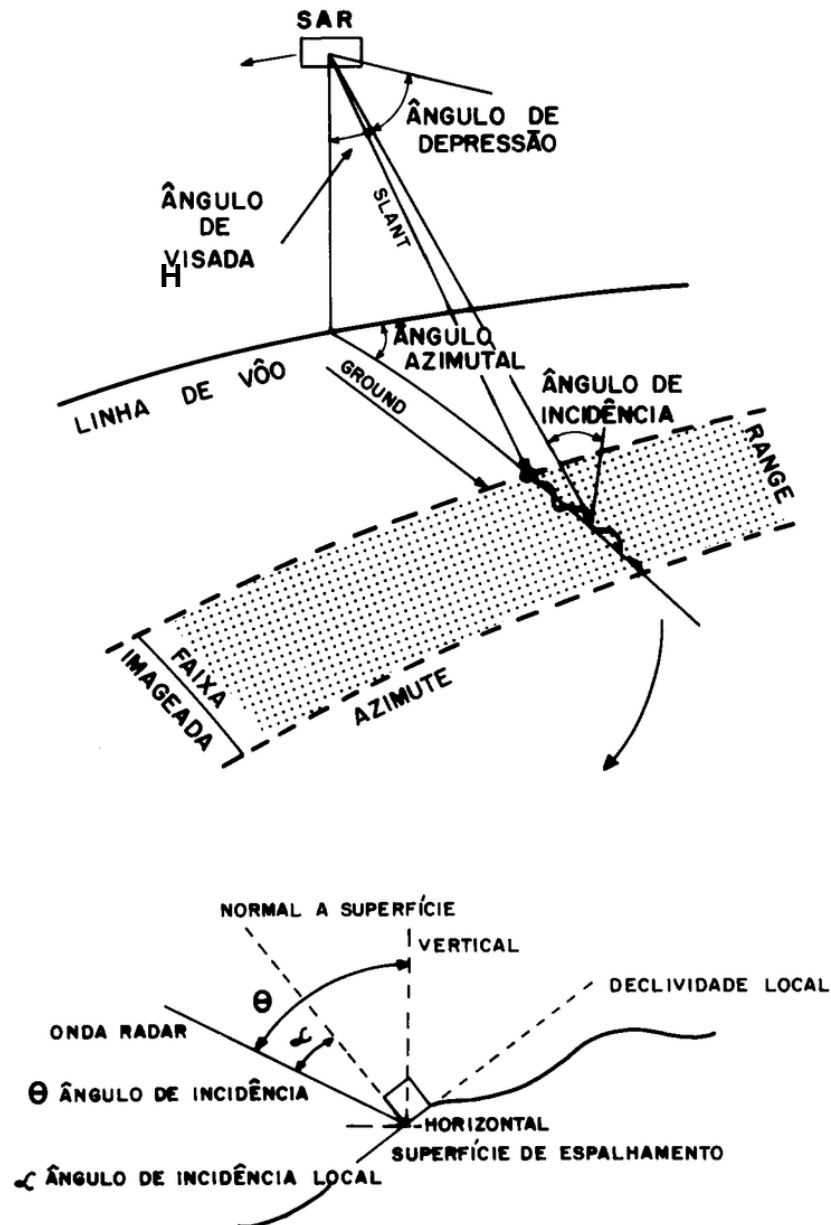


Figura 4. Geometria de imageamento do sistema radar de visada lateral. Fonte: Adaptado de Lowman et al. (1987).

Os radares imageadores podem operar em órbitas ascendente ou descendente (Figura 5). Na órbita ascendente, o satélite se desloca de sul para norte, com visada para leste (N78°), já na órbita descendente, o satélite se desloca de norte para sul, com visada para oeste (aproximadamente N282°).

O conceito de geometria de visada é primordial para compreender as informações dos alvos, pois alvos com orientação perpendicular à direção de iluminação são destacados, enquanto alvos paralelos a direção de visada não são detectados (WOODHOUSE, 2006).

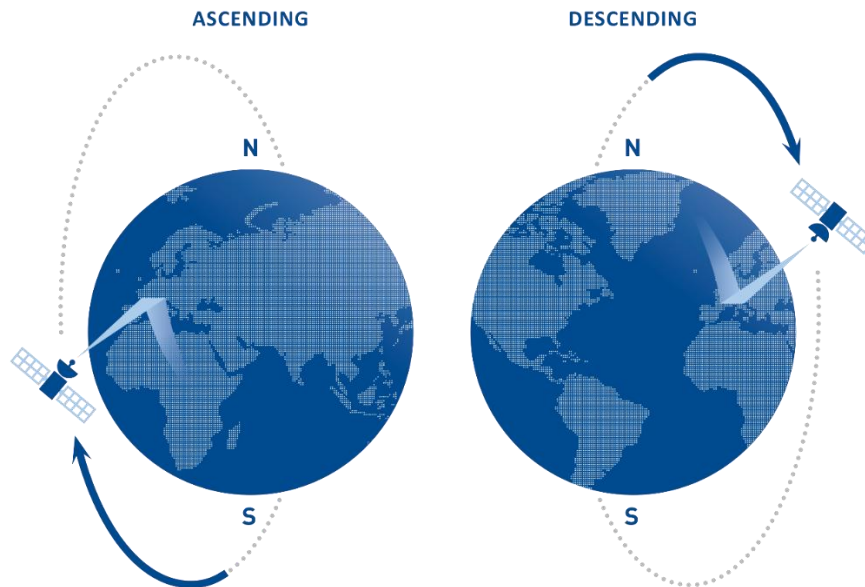


Figura 5. Geometria de imageamento orbital ascendente e descendente. Fonte: TRE Altamira, (2021).

2.1.2 Modos de operação dos imageadores de radar orbitais

Segundo Moreira et al. (2013) existem três tipos principais de modos de imageamento de radares orbitais: *StripMap*, *ScanSAR* e *Spotlight* (Figura 6).

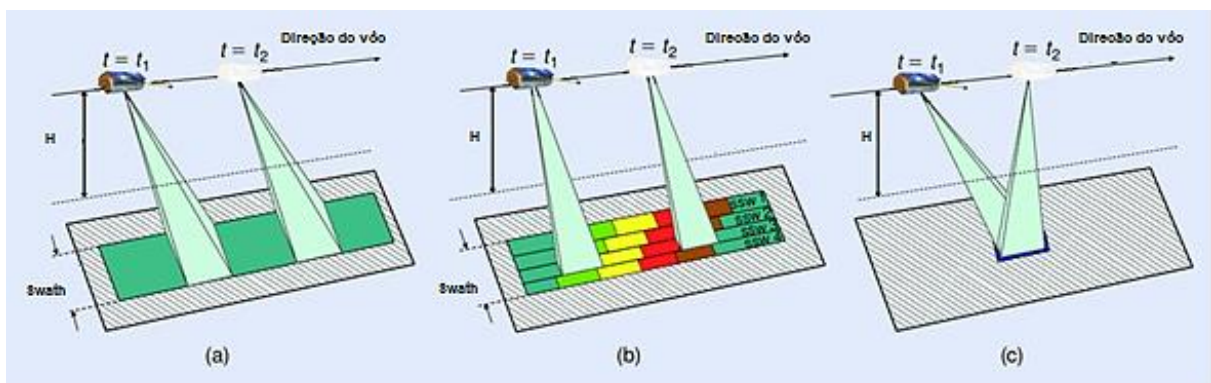


Figura 6. Principais modos de operação dos radares imageadores orbitais: (a) *StripMap*, (b) *ScanSAR* e (c) *Spotlight*. Fonte: Adaptado de Moreira et al. (2013).

No modo *StripMap* (SM) o apontamento da antena é fixo em relação a direção de voo, dessa forma o imageamento é paralelo ao deslocamento da plataforma. Nesse modo de imageamento, gera-se uma imagem de largura de faixa média, com uma boa resolução espacial. No modo *ScanSAR* (SC) o ângulo de depressão da antena é variado, o que corresponde a múltiplas faixas de imageamento (*swath*), ou seja, a antena é direcionada para produzir imagens adjacentes do terreno. Nesse modo de imageamento, as imagens possuem ampla faixa de cobertura e baixa resolução espacial. No modo *Spotlight* (SL) a antena é direcionada para iluminar sempre a mesma área da superfície conforme se desloca. Nesse caso, a antena cobre uma pequena área fixa, porém com altíssima resolução espacial.

2.1.3 A imagem de radar

A imagem de radar equivale a um conjunto de pixels, onde cada pixel dispõe de uma medida de amplitude e de fase da energia retroespalhada na direção do sensor/antena (WOODHOUSE, 2006). A informação de cada pixel é armazenada como um número complexo. Comumente, os dados de radar são adquiridos em alcance inclinado (*Slant Range*), no entanto, são projetados sobre a superfície (*Ground Range*).

Distorções geométricas podem ocorrer nas imagens do Radar de Abertura Sintética (SAR), em decorrência da topografia do terreno, que limitam (e até mesmo impossibilitam) a recuperação de informações. As principais distorções geométricas de imagens de radar são: encurtamento de rampa (*foreshortening*), inversão de relevo (*layover*) e sombra (*shadowing*) (Figura 7).

O encurtamento de rampa ou *foreshortening* ocorre quando a base e o topo da rampa são imageados ao mesmo tempo e abrangerão posição equivalente no plano de alcance inclinado (PARADELLA et al., 2021). A inversão de relevo ou *layover* ocorre quando o feixe de radar atinge o topo da feição de relevo antes de atingir a base. A sombra do radar ocorre quando o feixe do radar não consegue iluminar a superfície do solo. As sombras ocorrem atrás de encostas verticais ou encostas com lados íngremes, ou seja, nas áreas onde não foi possível o imageamento pela antena (WOODHOUSE, 2006).

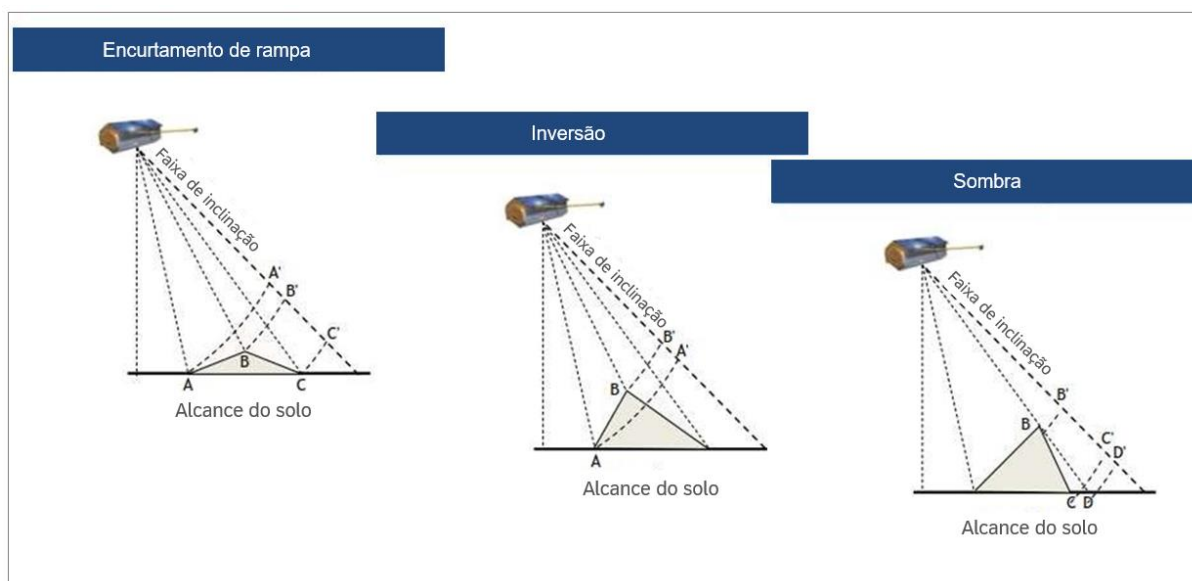


Figura 7. Diferentes tipos de distorções geométricas em imagens de radar. Fonte: Adaptado de DARES, (2021).

2.2 Princípios da Interferometria de Radar

A Interferometria por Radar de Abertura Sintética (InSAR) baseia-se nas variações de fase entre as sucessivas passagens da plataforma sobre o alvo. Existem três conceitos importantes para entender ondas, são elas: frequência (f) que corresponde ao número de oscilações produzidas pelo campo elétrico durante um intervalo de tempo (t) dado em Hertz (ciclos/s) a velocidade da radiação e o comprimento de onda (λ). A fase (ϕ) é uma grandeza física, expressa em radianos, que descreve a localização do ponto de vibração na curva senoidal (Figura 8), ou seja, explica em qual estágio do ciclo a onda se encontra em um determinado instante (t) (ESA, 2007):

$$\phi = \frac{2\pi r}{\lambda} \quad (1)$$

Onde λ é o comprimento de onda, r é a distância sensor-alvo e 2π se deve a natureza periódica da onda. Portanto, a variação de fase é proporcional a distancia sensor-alvo e sua sensibilidade depende do comprimento de onda.

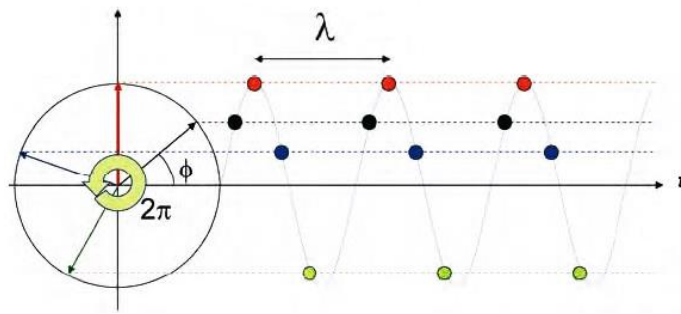


Figura 8. Representação gráfica da fase (ângulo que o vetor faz com o eixo horizontal). Fonte: Adaptado de ESA (2007).

2.2.1 Geometria de aquisição InSAR

Um interferograma é um mapa que retrata a variação da diferença de fase entre um par de imagens de radar. Existem dois modos básicos de imageamento para a geração de um interferograma: (a) o monoestático e o biestático (HANSSEN, 2001). No modo monoestático, duas antenas acopladas na mesma plataforma estão separadas por uma distância fixa, denominada de linha-base, e iluminam o alvo simultaneamente. Este método de iluminação encontra aplicação para o mapeamento topográfico. No modo biestático uma antena ilumina uma mesma área em diferentes momentos. Isso permite determinar as variações na distância entre o sensor e o alvo ao longo do tempo. Esse sistema vem sendo empregado para monitoramento de diversos fenômenos, tais como o deslocamento de geleiras, subsidência, soerguimento, escorregamentos de encostas, entre outros (KLEES e MASSONNET, 1999).

A Figura 9 ilustra a geometria de aquisição de imagens de radar para a geração de um interferograma.

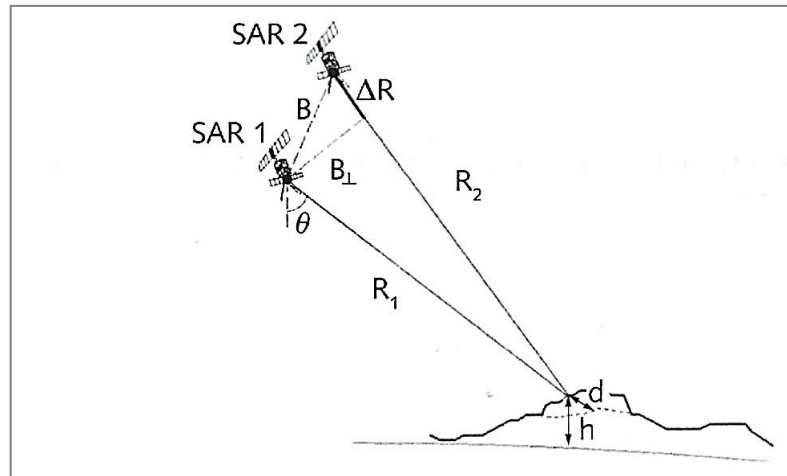


Figura 9. Geometria de aquisição InSAR. Fonte: Paradella et al., (2021).

Os elementos representados na Figura 9 correspondem a:

SAR 1 - Posição do satélite no instante t_1 ;

SAR 2 - Posição do satélite no instante t_2 ;

R_1 - Distância entre o sensor e o alvo na primeira aquisição;

R_2 - Distância entre o sensor e o alvo na segunda aquisição;

h - Altura do alvo em relação à superfície de referência;

d - Deslocamento do terreno entre as aquisições;

B - Linha-base espacial. Distância entre as duas posições do sensor. Definida pela base perpendicular e pela base paralela;

B_{\perp} - Linha-base perpendicular. Corresponde à distância efetiva entre as duas posições do sensor SAR no instante de cada aquisição e é perpendicular à direção da visada.

B_{\parallel} - Linha-base paralela. Corresponde à distância entre as duas posições do sensor na direção de voo do satélite.

2.3 Interferometria de radar

Um interferograma é o resultado do produto entre uma imagem de referência pelo complexo conjugado de uma imagem secundária adquirida sobre uma mesma área, porém a partir de posições ligeiramente distintas. A diferença de fase é constituída pela soma de diversas contribuições:

$$\Delta\varphi = \varphi_{\text{topo}} + \varphi_{\text{desl}} + \varphi_{\text{atm}} + \varphi_{\text{ruído}} \quad (2)$$

Onde:

- φ_{topo} - componente da fase devido à topografia do terreno;
- φ_{desl} - componente de fase devido aos deslocamentos da superfície;
- φ_{atm} - componente de fase devido aos efeitos atmosféricos;
- $\varphi_{\text{ruído}}$ – componente de fase devido ao ruído do sistema.

A componente de fase devido à topografia pode ser removida a partir de um modelo digital de elevação (MDE). Ela aparece devido as variações na posição das antenas em sucessivas passagens sobre uma mesma área. A componente atmosférica ocorre devido às variações nas condições atmosféricas (principalmente vapor de água). Esta componente não pode ser totalmente corrigida a partir de um único par de imagens de radar. Os ruídos podem ser atenuados a partir de filtragens. Estas duas últimas componentes afetam a qualidade do interferograma.

2.3.1 Descorrelação

A coerência interferométrica depende, especialmente, de dois mecanismos de descorrelação: (i) a geometria de imageamento e (ii) mudanças temporais no retroespalhamento.

A descorrelação espacial ou geométrica ocorre quando se tem variações na refletividade em função do ângulo de incidência, o que limita ainda mais o número de pares adequados para uso interferométrico (ROCCA et al. 2000).

A descorrelação temporal ocorre quando as condições físicas ou elétricas da superfície não permanecem estáveis entre duas ou mais aquisições, isso é relativamente comum de ocorrer, principalmente quando existe um longo intervalo de tempo entre a aquisição dessas imagens (ROSEN et al. 2000).

Tanto a descorrelação temporal como a geometria provocam a perda de coerência e conseqüentemente a diminuição na qualidade dos interferogramas (ROCCA et al. 2000).

2.3.2 Coerência Interferométrica

A coerência interferométrica é usada para avaliar a qualidade de um interferograma (BURGMANN et al. 2000).

A coerência é dada pelo coeficiente de correlação cruzado normalizado entre duas imagens SAR, sendo definido conforme equação:

$$\gamma = \frac{\langle c_1 c_2^* \rangle}{\sqrt{\langle c_1 c_1^* \rangle \langle c_2 c_2^* \rangle}} \quad (3)$$

onde c_i é a medida de dados complexos da imagem i , $\langle \rangle$ denota média espacial sobre uma área (conjunto de pixels) e $\langle c_1 c_2^* \rangle$ simboliza o estimador da fase.

O valor de coerência se relaciona inversamente com o desvio padrão da fase (FRANCESCHETTI e LANARI, 1999), estando compreendido entre 0 (incoerente) $\leq |\gamma| \leq 1$ (coerente).

2.3.3 Interferometria Diferencial SAR (DInSAR)

A interferometria diferencial SAR permite a detecção de deslocamentos na direção de visada do radar. Conforme a Equação 2, a diferença de fase interferométrica possui diversas contribuições. A técnica DInSAR, consiste em isolar a componente devido à deformação. Esta componente, é definida conforme expressão abaixo:

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} d \quad (4)$$

Em que d é a diferença de percurso do sinal devido ao deslocamento da superfície.

A técnica DInSAR foi criada por Gabriel et al. (1989). Mais tarde, diversos autores aplicaram a técnica e implementaram melhorias, tais como: Fielding et al. (1993), Massonnet et al. (1993), Werner et al. (2003), Lanari et al. (2004), Ferretti et al. (2007), Crosetto et al. (2011) e Pinto (2015).

Atualmente essa técnica ainda vem sendo aplicada para a detecção de deslocamentos superficiais em minas a céu aberto por vários pesquisadores no mundo (HARTWIG et al., 2013; MURA et al., 2014; PARADELLA et al., 2015a; GAMA 2019; GAMA 2020).

A tecnologia DInSAR apresenta algumas limitações, dentre elas pode-se citar o efeito atmosférico, que provoca um atraso na informação de fase (COLESANTI e WASOWSKI, 2003), o que levou, entre outras coisas, ao desenvolvimento da última geração da tecnologia InSAR.

2.4 Interferometria de radar de Abertura Sintética Diferencial Avançada (A-DInSAR)

A técnica de interferometria de radar de Abertura Sintética Diferencial Avançada (A-DInSAR) foi desenvolvida no início dos anos 2000 e consiste no processamento simultâneo de um grande conjunto de imagens de radar adquiridas sobre uma mesma área (CROSSETTO et al. 2015). Essa abordagem possibilita modelar a componente atmosférica e estimar os deslocamentos acumulados e a taxa de deslocamento com acurácia na escala de milímetros. Diversos estudos têm sido realizados para o monitoramento de taludes de mina a partir da técnica A-DInSAR (HARTWIG et al. 2013; PARADELLA et al. 2015b; PINTO et al. 2015; GAMA et al., 2019; GAMA 2020).

Dentre as técnicas de interferometria de radar que utilizam séries temporais destacam-se a *Persistent Scatterer Interferometry* – PSI (Ferretti et al. 2000 e 2001) e a *Small Baseline Subset* - SBAS (Berardino et al. 2002).

2.4.1 Interferometria de Radar por Espalhadores Persistentes (PSI)

A Interferometria por Espalhadores Persistentes (PSI) foi inicialmente elaborada no Instituto Politécnico de Milão – POLIMI, localizado na Itália, com o nome de PSInSAR (*Permanent Scatterer Interferometry Synthetic Aperture Radar*).

Com o avanço da tecnologia, várias abordagens dessa técnica surgiram. A técnica proposta por Ferretti et al. (2001) é patenteada e por esse motivo, o termo “*Permanent Scatterer*” é associado apenas à sua técnica, porém para os algoritmos desenvolvidos por outros autores, é utilizado o termo “*Persistent Scatterer Interferometry Synthetic Aperture Radar - PSP*” (KAMPES, 2006).

A técnica PSI remete a aspectos referentes a formação da imagem SAR, onde o valor de cada pixel contém o resultado da soma coerente dos retornos dos muitos espalhadores

contidos em um elemento de resolução. Se os espalhadores apresentem movimentos aleatórios entre si, isso provoca uma decorrelação do sinal de retorno. Mas, se o pixel for dominado por um espalhador estável, a variação do sinal de retorno é mínima, assim é possível calcular deformações milimétricas no terreno (Figura 10) (HOOPER et al., 2007). Os Espalhadores persistentes (PS) são alvos que refletem a energia de forma estável ao longo do tempo, mesmo quando vistos a partir de posições distintas.

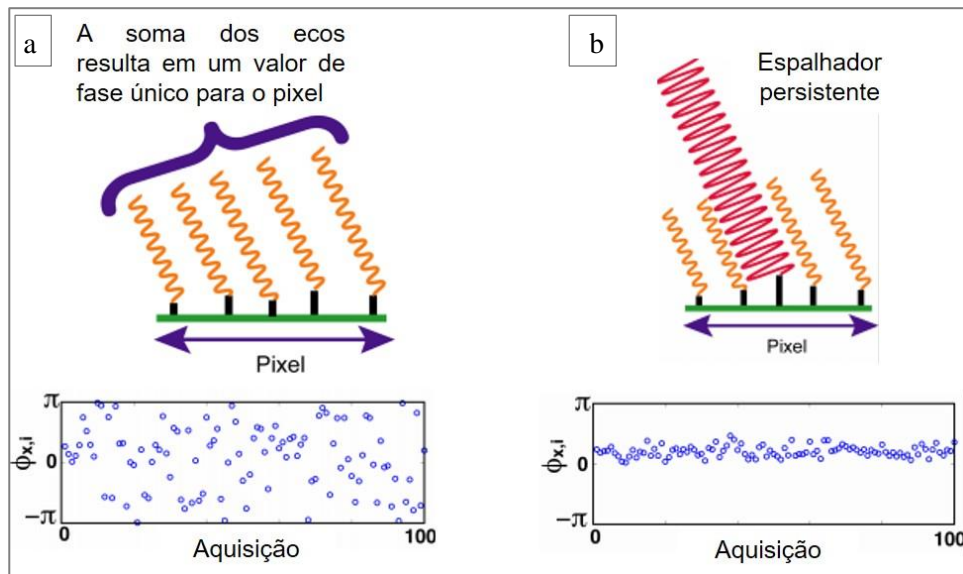


Figura 10. Comportamento da fase para um pixel com alvos distribuídos (a) e com um alvo persistente (b). Os gráficos abaixo mostram simulações de 100 iterações do valor de fase. Notar que em (a) ocorre dispersão no valor da fase e em (b) o oposto (estabilidade temporal). Fonte: Adaptado de Hooper et al., (2007).

A Figura 11 mostra um exemplo clássico da configuração das linhas de base normais B_n em relação a uma imagem mestre. As aquisições dos satélites configuram-se dentro de tubo de órbitas para uma determinada órbita nominal, que assegura a existência de passagens para construir pares interferométricos, visto que raramente o satélite passa sempre na órbita nominal (PARADELLA et al., 2021).

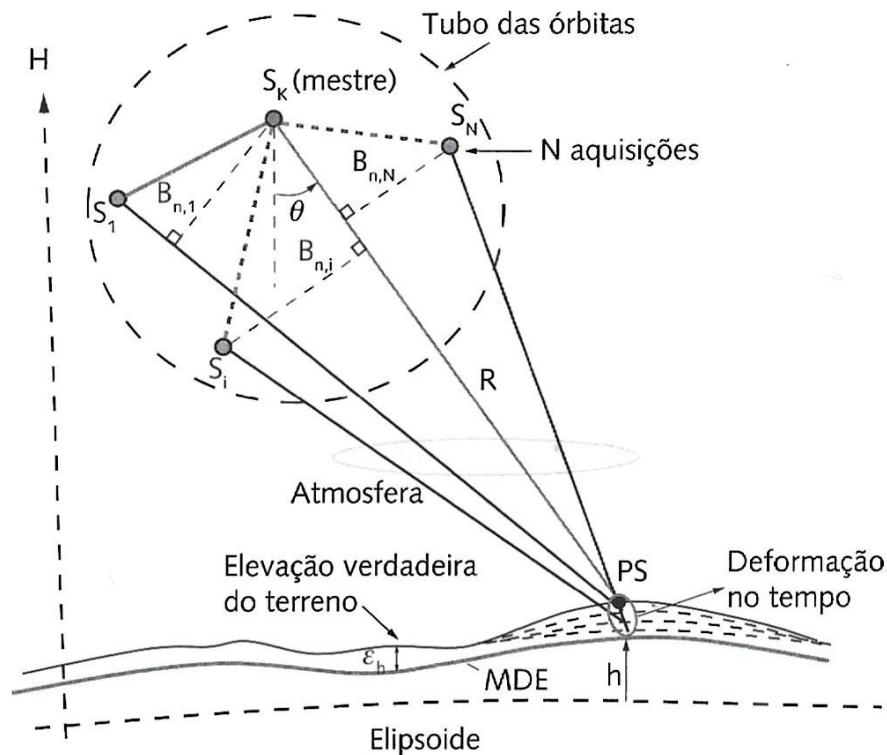


Figura 11. Exemplo de configuração de linha de base em relação a imagem mestre em um processamento PSI. Fonte: PARADELLA et al., (2021).

O produto resultante da aplicação da técnica é um conjunto de dados vetoriais, contendo as coordenadas geográficas de cada ponto de medição de um PS, juntamente com as medidas de deslocamento e as estatísticas associadas. A técnica PSI utiliza um número mínimo de 15 imagens corrigidas (FERRETI et al., 2001), para que seja possível realizar uma análise estatística dos erros de fase relacionados à atmosfera e ruídos.

A construção da pilha de interferogramas está relacionada a seleção de uma imagem de referência. Esta imagem de referência encontra-se usualmente no centro da série temporal, com intuito de aumentar a coerência interferométrica (PARADELLA et al., 2015a).

No processamento PSI, inicialmente, selecionam-se os pixels que podem ser candidatos a *Persistent Scatterers* (PS), normalmente são aqueles que apresentam alta relação sinal-ruído e são analisados através do desvio padrão da amplitude (a amplitude está relacionada a fase do sinal), pixel por pixel, na série de interferogramas. A partir disso, cada pixel candidato a PS

passa a ser testado em termos de sua estabilidade de amplitude na série temporal (FERRETTI et al., 2000).

Um ponto de referência estável (PS_{ref}) deve ser selecionado no domínio da imagem, pois as medidas de diferença de fase são relativas tanto no tempo como no espaço. Por exemplo, um PS_j genérico, pode mostrar as diferenças de fase pertinente à imagem mestre, o que corresponde aos M interferogramas ($M=N-1$) e aos PS de referência (PS_{ref}), que combinadas resultam em um vetor de fase diferencial $D_{\phi PS}$ com o passar do tempo (Figura 12) (PARADELLA et al., 2021).

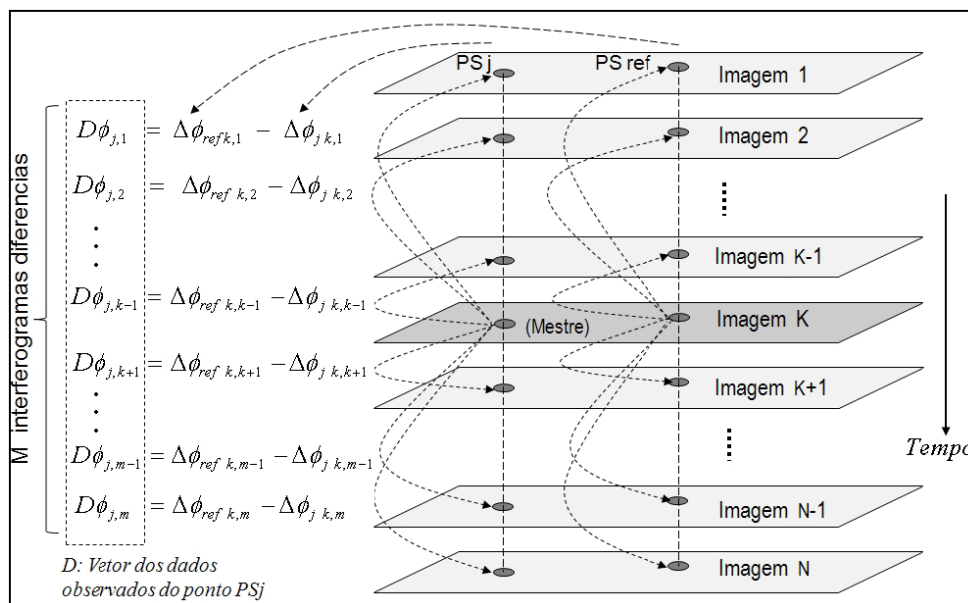


Figura 12. Ilustração das componentes de fase de um espalhador persistente em relação a imagem mestre. Fonte: PARADELLA et al., (2015a).

As M componentes do vetor de fase diferencial ($D\Phi$) podem ser fragmentadas em um somatório de contribuições relacionadas ao deslocamento do ponto PS_j (Φ_{desl}) (PARADELLA et al., 2021), tais como: fase atmosférica (Φ_{atm}), fase do erro no modelo digital de elevação (Φ_{eh}), erro na estimativa da linha de base (Φ_{Bn}) e ruídos ($\Phi_{ruído}$) formando um sistema completo de M equações:

$$D\Phi_{PSj} = \Phi_{PSj_desl} + \Phi_{PSj_eh} + \Phi_{PSj_atm} + \Phi_{PSj_Bn} + \Phi_{PSj_ruído} \quad (5)$$

O grande objetivo da técnica PSI consiste em separar as componentes de fase pertinentes ao vetor deslocamento (Φ_{desl}) dos demais vetores componentes de fase original. Uma importante

limitação dessa técnica, está relacionada a impossibilidade de detectar deslocamentos puros na direção vertical ou horizontal, quando se utiliza imagens de apenas uma única órbita (ascendente ou descendente).

2.4.2 *Small baseline subset* (SBAS)

Small Baseline Subset (SBAS) é uma tecnologia proveniente da técnica DInSAR Times-séries (DTS), trata-se de um algoritmo que aplica a técnica dos mínimos quadrados para identificar os deslocamentos da superfície terrestre. Esse algoritmo utiliza um grande número de interferogramas diferenciais que apresentam linhas de base curtas. Ou seja, os interferogramas são gerados com pares de dados SAR caracterizados por pequenas linhas de base espaciais e temporais entre as aquisições. Portanto, o SBAS maximiza os pontos de medição confiáveis mitigando o ruído (BERARDINO et al. 2002).

Diferentemente da técnica PSI na qual os interferogramas são gerados com respeito a uma imagem de referência, na técnica SBAS os interferogramas são gerados com base em linhas de base espacial e temporal curtas. Os interferogramas formam uma rede que interliga as imagens de acordo com o tempo máximo selecionado entre as aquisições e o comprimento máximo selecionado da linha de base espacial (GAMA et al., 2017).

A Figura 13 mostra um exemplo de uma rede de 67 interferogramas gerados a partir de um conjunto de 33 imagens do satélite TerraSAR-X (modo *stripmap*), com intervalo máximo de aquisição de 45 dias e linha de base máxima de 550 m (PARADELLA et al., 2021).

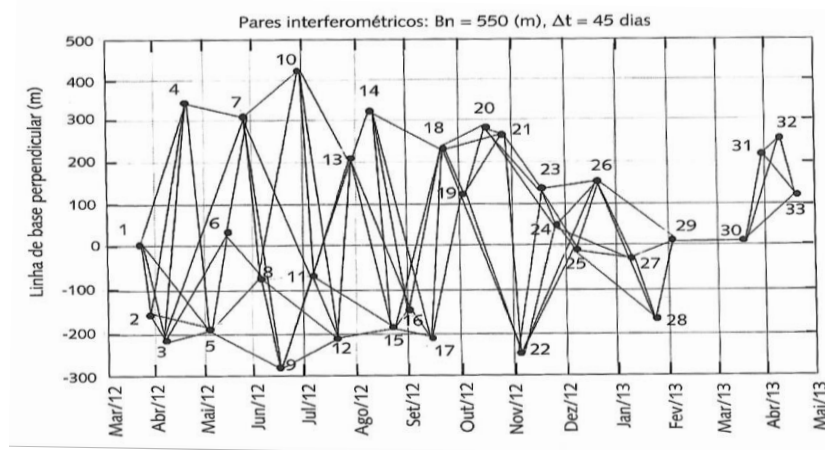


Figura 13. Rede de interferogramas gerados a partir de 33 imagens do satélite TerraSAR-X usada na técnica SBAS. Fonte: PARADELLA et al. (2021).

Outro ponto importante a citar é que ambas as metodologias PS e SBAS, exploram pilhas de interferogramas diferenciais formados com base nas conexões das aquisições dos satélites. Comparativamente, a abordagem PS é ideal para em alvos pontuais permitindo medidas de deslocamentos lineares, enquanto a SBAS é mais apropriada para alvos distribuídos permitindo obter medidas de deslocamentos lineares e não lineares, coletando medidas milimétricas sobre uma superfície deformada mais ampla (SOUSA et al. 2011). A combinação das duas abordagens pode dar uma melhor definição do padrão de deformação de uma área.

O método SBAS é adequado para o levantamento em escalas regionais, já o PSI pode ser aplicado em escalas locais e de forma complementar ao SBAS. Vale destacar que tanto o SBAS como o PSI podem ser ferramentas valiosas fornecendo dados quantitativos de deslocamentos e importantes correlações com as observações de campo (LAUKNES et al., 2010).

3. O QUADRILÁTERO FERRÍFERO

3.1 Aspectos fisiográficos

3.1.1 Clima

O clima predominante na região do Quadrilátero Ferrífero (QFe) de acordo com a classificação de Köppen é do tipo Cwa, ou seja, clima subtropical de inverno seco e verão quente. As médias de temperatura variam entre 19° e 27° C ao longo do ano. A precipitação média anual varia entre 1.400 mm e 2.316 mm (HERZ, 1978). O clima pode também ser definido, de modo geral, como tropical de altitude, em função de um tipo tropical influenciado por fatores altimétricos, que contribuem fortemente para a amenização das temperaturas (LUME, 2007).

Segundo INMET (2019) a média de precipitação anual conforme as Normais Climatológicas de João Monlevade (Figura 14), referente ao período entre 1961 e 1990, equivale a cerca de 1.401 mm. Percebe-se que os meses de novembro, dezembro e janeiro são os mais chuvosos, com precipitações médias de 250,2 mm, 326,7 mm e 232,8 mm, respectivamente. Os meses junho, julho e agosto compreendem o trimestre mais seco, com precipitações médias inferiores a 15 mm mensais.

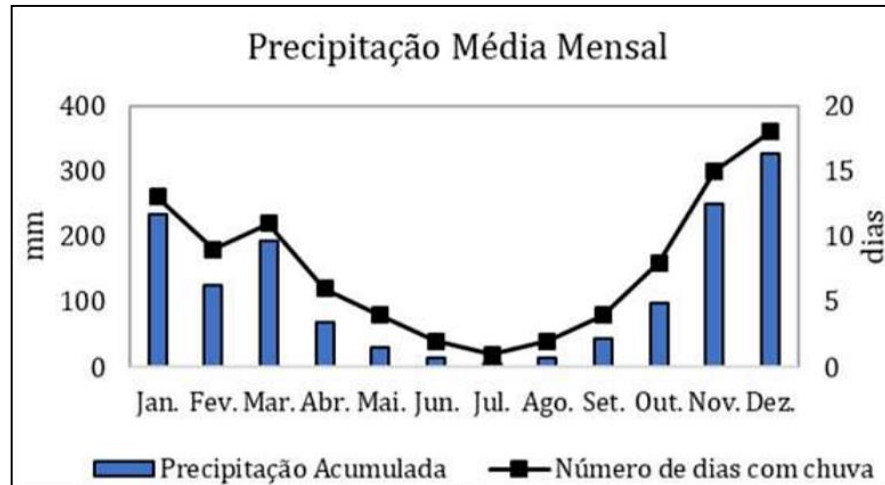


Figura 14. Precipitação média mensal e dias chuvosos de acordo com as normais climatológicas da estação João Monlevade (1990 – 2010). Fonte: INMET (2019).

Na região próxima da Mina de Brucutu, de acordo com o sistema Köppen, o clima é caracterizado como tropical de altitude com verões frescos e estação seca bem definida. Em áreas com maiores altitudes é comum a existência de forte radiação solar, incidência de ventos, elevada amplitude térmica diária e muitas vezes tempestades de raios (DUTRA et al., 2002).

3.1.2 Relevo

O relevo da região do QFe possui em geral um aspecto acidentado, devido as formações geológicas presentes (quartzitos e itabiritos), associadas aos compartimentos tectônicos que moldam o cenário da região, circundando depressões ocupadas por morros e colinas sustentados por complexos ígneo-metamórficos (SILVA, 2007). A própria denominação do Quadrilátero Ferrífero (QFe) teve sua origem na configuração de uma estrutura muito complexa de cadeia dobrada, cujas rochas desenharam um sistema quadrado de cristas (Figura 15). Estas serras se estendem até os limites do cráton e da bacia sedimentar Fanerozoica do São Francisco (ALKMIM, 2018).

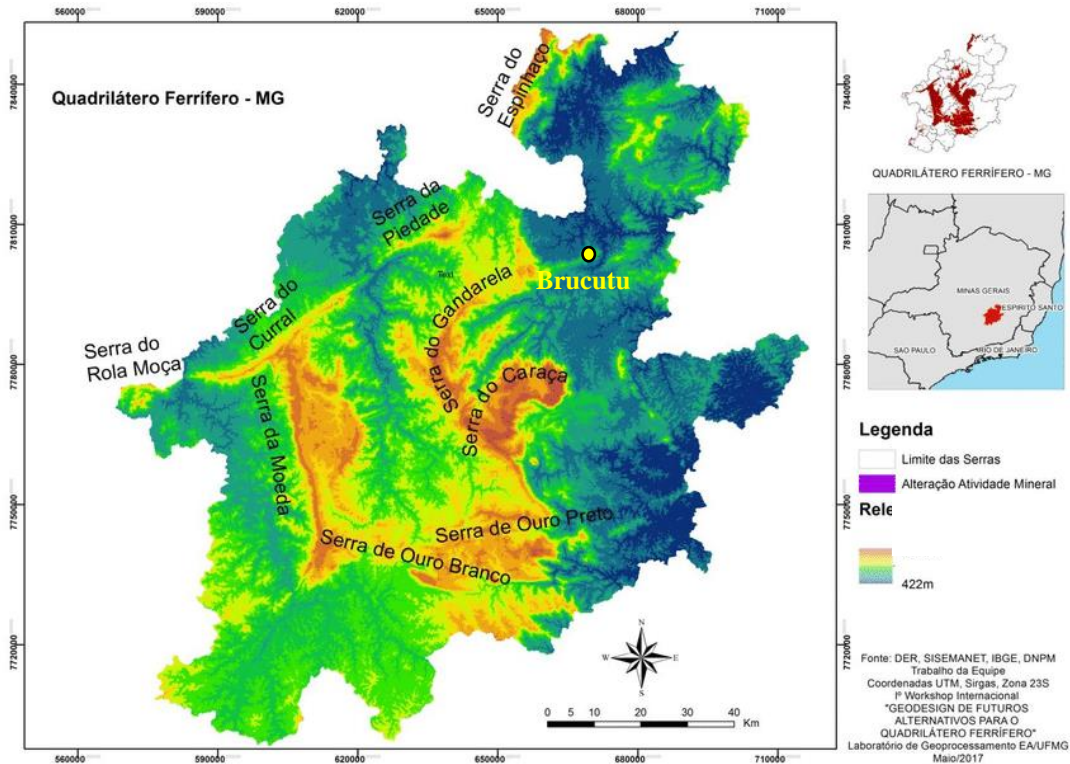


Figura 15. Modelo digital de elevação, com enfoque ao pronunciado relevo do Quadrilátero Ferrífero e indicação da mina de Brucutu (amarelo). Fonte: Adaptado de Casagrande, (2018).

O controle lito-estrutural e a influência morfoclimática, controlam a gênese das coberturas detrítico-lateríticas cenozoicas, sendo esses fatores preponderantes para a configuração do relevo do Quadrilátero Ferrífero. Os sucessivos ciclos erosivos atuantes desde o Proterozoico geraram o modelo de dissecação em megaestruturas dobradas formando anticlinais escavados e sinclinais alçados.

A Mina de Brucutu encontra-se no extremo nordeste do Sinclinal Gandarela, mais precisamente na Serra do Tamanduá. Esta, possui altitudes que alcançam até 1.100 metros, sustentadas principalmente por formações ferríferas bandadas, que favoreceram a instalação de uma das maiores minas da Vale S.A. (SILVA, 2007; VALE S.A., 2019).

3.1.3 Hidrogeologia

No Quadrilátero Ferrífero destacam-se os sistemas aquíferos relacionados a formações ferríferas pertencentes a Formação Cauê, rochas quartzíticas (formações Moeda, Cercadinho, Taboões e Itacolomi), rochas carbonáticas (Formação Gandarela) e depósitos de cobertura (alúvios, colúvios e elúvios). Além disso, existem os aquíferos superficiais que apresentam

potencial de armazenamento e exploração representados pela alteração química de rochas granito-gnáissicas dos complexos metamórficos (Bação, Caeté, Belo Horizonte etc.) e de xistos (Nova Lima, Maquiné, Sabará etc.) (Figura 16).

As rochas pelíticas (e.g. Batatal, Fecho do Funil e Barreiro) e intrusivas básicas (diques) são importantes na configuração do sistema hidrológico regional, pois atuam como compartimentadores do fluxo subterrâneo, constituindo aquíferdos e/ou aquícludes (MOURÃO, 2007).

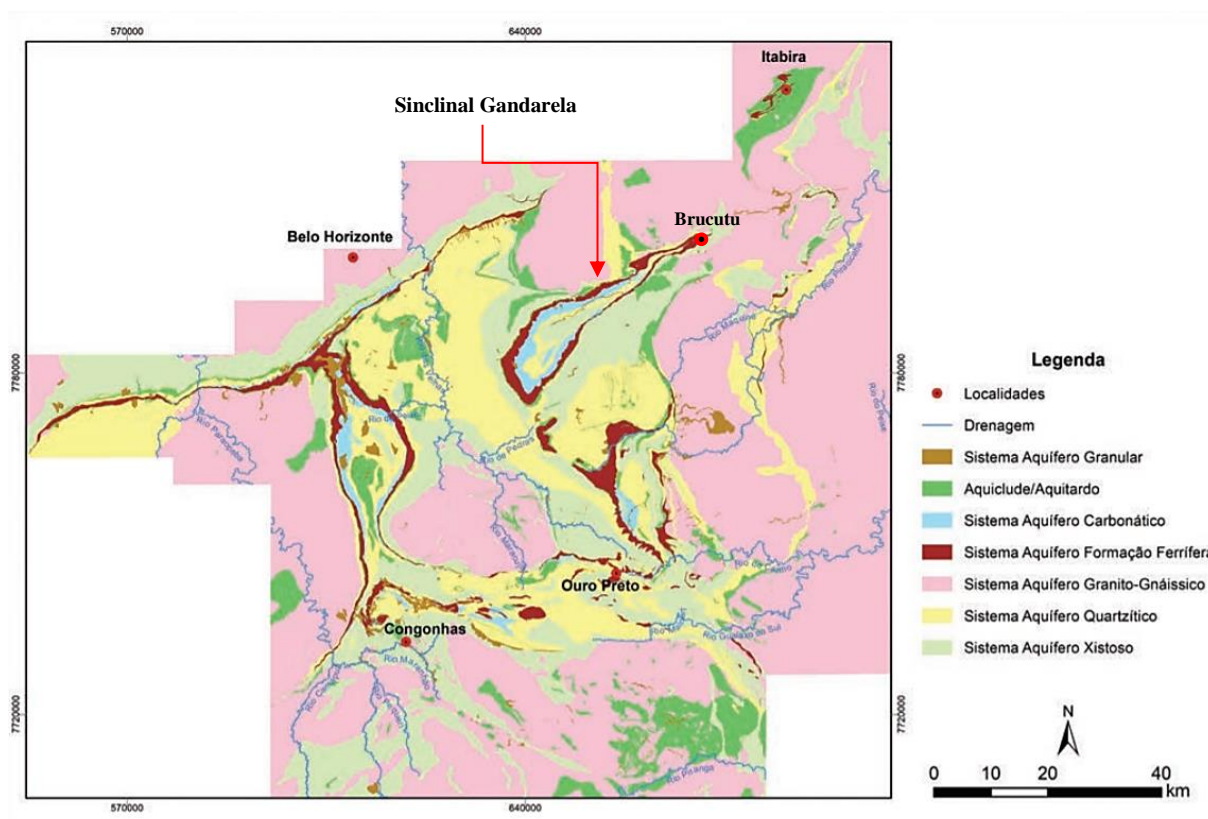


Figura 16. Mapa hidrogeológico do Quadrilátero Ferrífero e indicação da mina de Brucutu (preto e vermelho). Modificado de Dorr (1969), Beato et al. (2005), Mourão (2007), Endo et al. (2019).

O Sinclinal Gandarela, ao qual a área de estudo está inserida, é constituído principalmente pelas formações ferríferas da Unidade Cauê, envoltas externamente pelos filitos Batatal, considerados em grande parte como aquícludes. No entanto, quando em condições em que é possível obter interseções estruturais e tectônicas, estes filitos podem assumir o papel de aquíferdos, permitindo a passagem de água para a unidade adjacente (Formação Moeda). Na porção externa a estas unidades supracitadas, estão presentes as unidades xistosas de média a baixa permeabilidade representadas pelo Grupo Nova Lima e quartzitos do Grupo Maquiné. O

núcleo do Sinclinal Gandarela possui um potencial aquífero inferior quando comparado as formações ferríferas; ele é composto por rochas das unidades Gandarela, Cercadinho e Sabará (MOURÃO, 2007; ENDO et al., 2019).

3.2 Geologia

3.2.1 Estratigrafia

O Quadrilátero Ferrífero está situado na região do centro de Minas Gerais, e cobre uma área de aproximadamente 7.190 km² (DORR, 1969). A configuração do QFe é bastante complexa, estruturada a partir de um conjunto de cadeias de montanhas dobradas, cujas camadas de quartzitos e itabiritos desenharam um sistema quadrado de cristas. A morfogênese realçou em posição topográfica dominante com relação às depressões alveolares e abertas nos granitos, gnaisses e xistos, entre outras rochas. O seu contorno em mapa é o de um polígono de quatro vértices representado pelas cidades de Sabará, Itabira, Mariana e Congonhas.

O arcabouço geológico do QFe compreende, basicamente, três grandes conjuntos de unidades rochosas: os complexos metamórficos de idade arqueana (gnáissico-migmatítico), sequência metavulcanossedimentar do tipo *greenstone-belt* de idade arqueana (do Supergrupo Rio das Velhas) e supracrustais de idade paleoproterozoica do Supergrupo Minas, Grupo Sabará e Grupo Itacolomi (DORR, 1969; NOCE, 1995; MACHADO et al. 1996; ENDO e CARNEIRO, 1996; ALKMIM e MARSHAK, 1998). Atualmente, em comemoração aos 50 anos do avanço do conhecimento sobre o Quadrilátero Ferrífero, ENDO *et al.*, 2019a apresentaram uma nova proposta sobre as unidades litodêmicas e litoestratigráficas do QFe (Figura 17):

- i) Complexos Metamórficos, compostos por gnaisses bandados ou não, migmatitos, granitoides, anfíbolitos e corpos máficos e ultramáficos;
- ii) Supergrupo Rio das Velhas, formado por rochas metassedimentares clásticas e químicas, metavulcanoclásticas e metavulcânicas félsicas, máficas e ultramáficas;
- iii) Supergrupo Minas, apresentando rochas metassedimentares clásticas e químicas;

Complexos metamórficos

Os complexos metamórficos do QFe compreendem uma diversidade litológica com ampla exposição na porção sul-sudoeste. Estas unidades são constituídas predominantemente por gnaisses bandados, com ou sem inclusões anfíbolíticas, migmatitos e granitos de composições variadas, anfíbolitos, ortognaisses finamente laminados, corpos intrusivos de granitoides leucocráticos, veios aplíticos e diques máficos de diferentes gerações. O comportamento metamórfico desta unidade é, em geral, polifásico, sendo afetada por um metamorfismo regional em condições de fácies anfíbolito médio a superior, tendo sido sujeita, posteriormente, a transformações metamórficas retrógradas em condições de fácies xisto-verde (CORDANI *et al.* 1980; JORDT-EVANGELISTA e MULLER, 1986; CARNEIRO, 1992, LANA *et al.* 2013, FARINA *et al.* 2016, ENDO *et al.* 2019b).

Supergrupo Rio das Velhas

O Supergrupo Rio das Velhas é composto, da base para o topo, pelos grupos Nova Lima e Maquiné (DORR, 1969). O Grupo Nova Lima é constituído por filitos, filitos grafitosos, clorita xistos, sericita xistos, metagrauvas, rochas máficas e ultramáficas, formações ferríferas do tipo algoma, metacherts e dolomitos.

Sobrepõem-se em discordância erosional, com níveis conglomeráticos na base, quartzitos maciços e sericíticos, sericita-quartzo xistos, metaconglomerados oligo e polimíticos e filitos do Grupo Maquiné (DORR, 1969; MAXWELL, 1972). As rochas ultramáficas, situadas na borda leste do QFe, inicialmente interpretadas como de idade pós-Minas (e.g. DORR 1969) foram, posteriormente, designadas de Grupo Quebra Osso (SCHORSCHER, 1978) e posicionado na base do Supergrupo Rio das Velhas.

Supergrupo Minas

O Supergrupo Minas é uma sequência metassedimentar de idade paleoproterozoica (MACHADO *et al.*, 1989) cuja organização estratigráfica, em essência, permanece a mesma desde a definição original de Derby (1906) sendo constituído por xistos, quartzitos, dolomitos e formação ferrífera, assentada discordantemente sobre gnaisses e mica-xistos.

O Supergrupo Minas é constituído, da base para o topo, dos grupos Tamanduá, Caraça, Itabira e Piracicaba. Representa uma sucessão continental-marinha (DORR, 1969) e compreende um dos estágios de evolução de uma bacia de margem passiva (ALKMIM & MARTINS NETO, 2012).

Vale destacar que o minério de ferro explotado na mina de Brucutu está contido nas formações ferríferas do Grupo Itabira.

Supergrupo Estrada Real

O Supergrupo Estrada Real é constituído pelos grupos Sabará e Itacolomi (TEIXEIRA DA COSTA, 1961), e evidencia uma sucessão do tipo *flysch* e molassa sin-orogênicos (DORR 1969, NOCE 1995, REIS et al. 2002). A nova nomenclatura de Estrada Real provém da redefinição do Grupo Sabará de Almeida et al. (2005).

Supergrupo Espinhaço

A Serra do Espinhaço, com mais de 1200 km de extensão, atravessa, em direção próxima ao meridiano, os estados da Bahia e de Minas Gerais. Representado por sequências predominantemente metassedimentares do Grupo Costa Sena, tipicamente são reconhecidas as formações Barão do Guaicuí e Bandeirinha. A primeira inclui variados tipos de xistos, muitas vezes com cianita, clorita xistos, quartzitos, formações ferríferas, metaconglomerados e metavulcânicas ácidas. A segunda, é constituída por quartzitos, normalmente micáceos, com estratificações cruzadas de médio porte, metaconglomerados matriz-suportados e, mais raramente, rochas xistosas, intercaladas especialmente em suas seções mais basais (KNAUER, 2013).

Suítes Intrusivas Máficas e Ultramáficas

As intrusões máficas e ultramáficas pós-Minas desenvolvem-se por toda extensão do QFe, sendo que na porção meridional, nos domínios do Complexo Metamórfico Santo Antônio do Pirapetinga (RAPOSO, 1991), essas intrusões são mais significativas (SUITA et al., 2007; ENDO et al. 2019a,b).

A Suíte Santa Rita de Ouro Preto é definida por um magmatismo tipicamente ultramáfico intrusivo nas unidades metassedimentares do Paleoproterozoico, representado por um batólito na região de Santo Antônio do Pirapetinga, e por vários *stocks* e por um enxame de diques (ENDO et al. 2019a,b).

Unidades Cenozoicas

As unidades cenozoicas compreendem os principais depósitos sedimentares do QFe: bacias do Fonseca (MAXWELL, 1972), bacias do Gandarela (GORCEIX, 1884) e bacia do Gongo Soco (MAIZATTO, 1993).

Além disso, três tipos de materiais são encontrados nas unidades cenozoicas, são elas: canga, aluvião e elúvio/colúvio. A canga é composta de um aglomerado rochoso constituído por fragmentos de formação ferrífera e, secundariamente, de filito e quartzo cimentados por óxido de ferro. Os materiais aluvionares são incomuns no QFe, pelo fato da maioria dos canais de fluxo se encontrarem bem acima dos níveis de base regionais. Já os depósitos elúvio-coluvionares ocorrem com maior frequência em todo o QFe, especialmente nas regiões elevadas onde ocorrem formações ferríferas e quartzitos (ENDO et al. 2019a,b).

As unidades litoestratigráficas supracitadas podem ser resumidas e representadas na Figura 18.

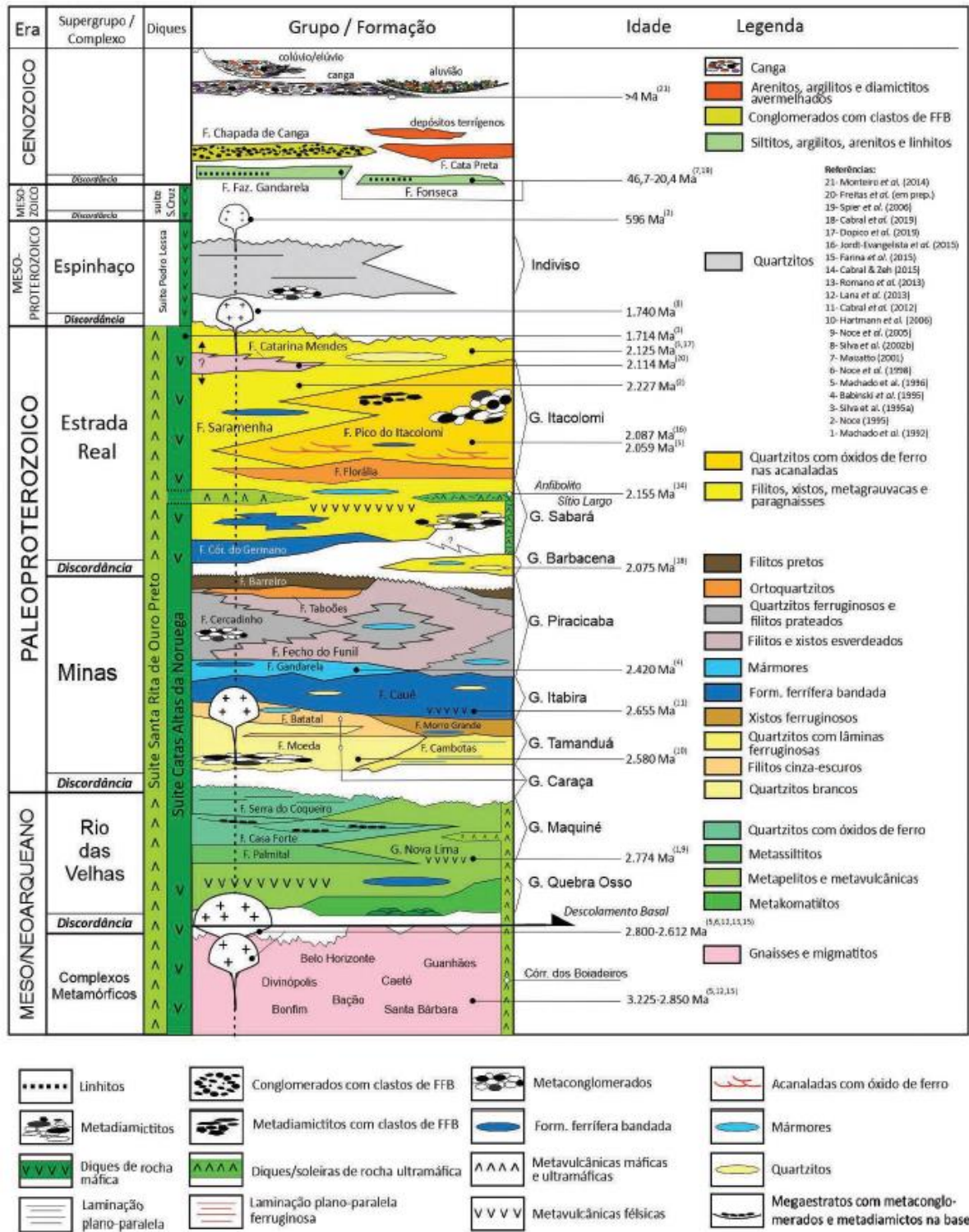


Figura 18. Coluna Estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero (Endo et al. 2019b). Fonte: Castro et al., (2020).

3.2.2 Arcabouço estrutural

O arcabouço estrutural do QFe é constituído, em sua essência, por dobras de várias gerações associadas às diferentes fases e eventos tectônicos que atuaram na região (ENDO 1997, ALMEIDA et al 2001, ALMEIDA et al. 2002, ALMEIDA et al. 2003, ALMEIDA 2004, ALMEIDA et al. 2005). As dobras de escala regional do QFe são:

Da primeira geração (*Nappe* Curral com vergência para N-NE):

- Anticlinal Bonfim;
- Anticlinal Curral;
- Sinclinal Moeda;
- Sinclinal da Mutuca;
- Anticlinal dos Fechos;
- Anticlinal Catarina;
- Sinclinal das Gaivotas;
- Sinclinal Mangabeiras.

Da segunda geração (Sistema de *Nappes* Ouro Preto com vergência para S-SW):

- Sinclinal Gandarela;
- Sinclinal Ouro Fino;
- Anticlinal Conceição;
- Sinclinal Santa Rita;
- Sinclinório de Itabira
- Sinclinório João Monlevade - Rio Piracicaba;
- Anticlinal de Mariana;
- Sinclinal Dom Bosco

Dobras da terceira geração (resultantes de redobramento):

- Falhas e Zonas de Cisalhamento

A primeira geração caracteriza-se por megadobras isoclinais recumbentes transportadas sobre superfícies de cavalgamento. A esta geração associa-se uma xistosidade S1, penetrativa e plano-paralela ao acamamento, correspondente a feição reliquiar da *Nappe* Curral. A segunda geração se caracteriza por redobramentos coaxiais gerando clivagem S2 penetrativa e oblíqua ao acamamento, como ocorre na sequência da deformação do Sistema de *Nappes* Ouro Preto. A vergência deste dobramento é para SSW (ENDO 1997, ALMEIDA et al 2001, ENDO et al. 2019a,b). As feições de redobramento ou amplificação da terceira geração de estruturas no QFe são resultantes de duas direções de encurtamento crustal, uma E-W e outra N-S, ambas relativas à tectônica de idade Brasiliana (ENDO et al. 2019a,b). As falhas e zonas de cisalhamento associadas ao Sistema de *Nappes* Ouro Preto delimitam as *nappes* desse sistema, sendo elas a

Zona de Cisalhamento São Vicente e as falhas São Bento, de Água Quente, Rio Piracicaba e Itacolomi (BARBOSA et al. 2017, BARBOSA 2018, ENDO et al. 2019a,b).

O arcabouço estrutural do Supergrupo Minas foi edificado durante a orogênese Minas a partir de dois eventos de dobramentos coaxiais e sucessivos ocorridos em tempos pré-Itacolomi (ENDO 1997, ALMEIDA 2004, ENDO et al. 2019a, b). Destaque ao Sinclinal Gandarela (Dorr, 1969) área foco do presente estudo (Figura 19), orientado regionalmente segundo a direção NE-SW. Na parte central para NE da estrutura, os limbos, que apresentam mergulhos de 40°- 60° SE, convergem tornando a dobra apertada a isoclinal, produzindo inversão do flanco leste. A falha do Fundão secciona toda a aba sul e limita a continuidade do sinclinal para NE.

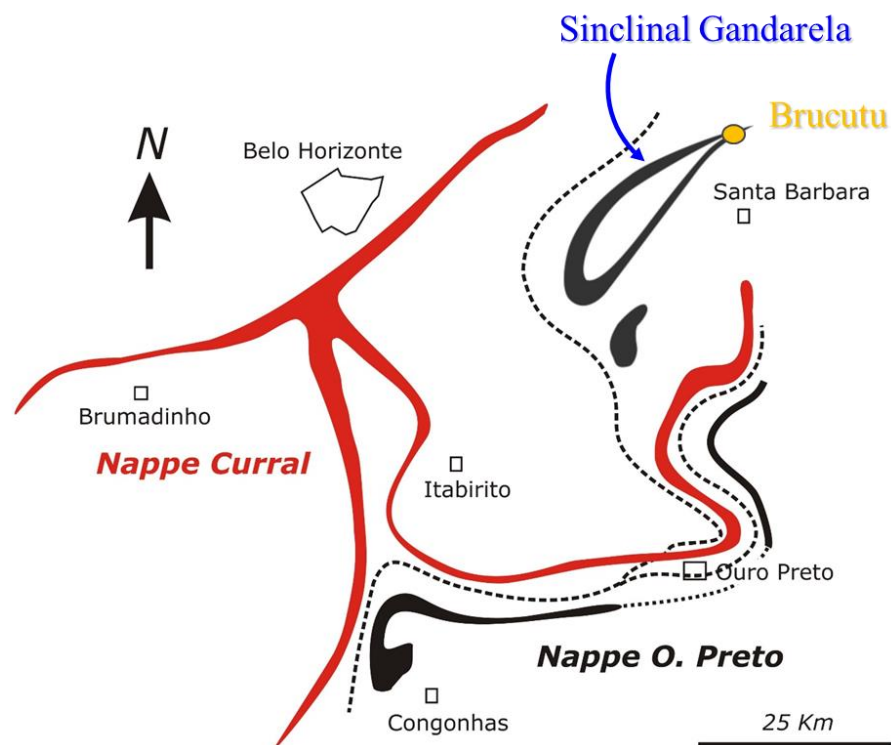


Figura 19. Mapa esquemático da articulação dos sistemas de nappes do Quadrilátero Ferrífero com destaque para o Sinclinal Gandarela, onde está situada a mina de Brucutu. Fonte: Adaptado de Castro et al., (2020).

Com base em Endo et al. (2004a) e Endo et al. (2008) o arcabouço tectônico da terminação do Sinclinal Gandarela é resultado da atuação de quatro eventos tectônicos distintos (Figura 20):

- O evento E1 corresponde ao evento tectono-metamórfico Transamazônico ou à orogênese Minas responsável pela geração de toda a trama penetrativa do Supergrupo Minas, ou seja, inversão da Bacia Minas;
 - Fase D1: Nappe de escala regional com vergência pra S-SW. Foram geradas dobras recumbentes com eixo horizontalizado;
 - Fase D2: caracteriza-se pelo redobramento coaxial das dobras anteriormente nucleadas. Esse dobramento progressivo coaxial da fase D1, foi responsável pelos dobramentos de segunda ordem do flanco inverso da *nappe* principal (Sinclinais Gandarela, Ouro Fino e Santa Rita);
- Evento E2: Magmatismo pós-Minas (Espinhaço), responsável pela intrusão de corpos máficos e ultramáficos e granitóides do tipo Peti (natureza alcalina) e basculamento das supracrustais;
- Evento E3: compressão E-W responsável pelo desenvolvimento de falhas de empurrão, dobras assimétricas sub-regionais, formação de clivagens de crenulação de direção NE-SW associadas às dobras de pequena amplitude e comprimento de onda vergentes para W e amplos dobramentos com eixos apresentando caimentos para SE. Adicionalmente, compreende duas fases de dobramento progressivo de orientação W-E e N-S;
- Evento E4: geração de um sistema de grábens que receberam sedimentos argilosos avermelhados e sedimentos relacionados a fluxo de detritos.

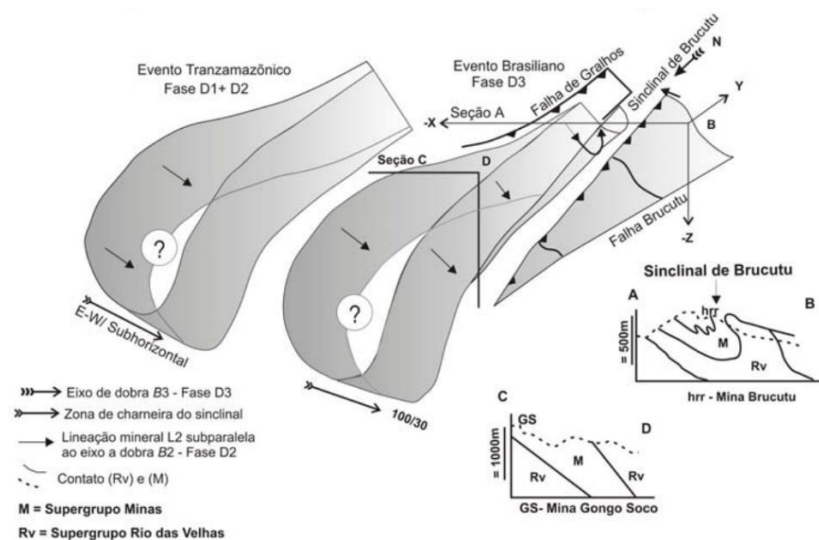


Figura 20. Modelo evolutivo para a região do sinclinal Gandarela proposto por Endo et al. (2004). Sendo hrr: corpos de hematita ricos em Ferro (> 64 %). Fonte: Adaptado Oliveira et al. (2005).

4. A MINA DE FE DE BRUCUTU

4.1 Localização, acessos e histórico

A Mina de Brucutu localiza-se na porção nordeste do Quadrilátero Ferrífero, no Município de São Gonçalo do Rio Abaixo, a aproximadamente 120 km a leste de Belo Horizonte, capital do estado de Minas Gerais. O acesso, partindo de Belo Horizonte é feito pela BR-262/BR-381 sentido Vitória. Após percorrer aproximadamente 75 km, toma-se a MG-436 em direção a cidade de Barão de Cocais. Em seguida, após cerca de 20 km, acessa-se uma estrada vicinal entre Barão de Cocais e São Gonçalo do Rio Abaixo (Figura 21).

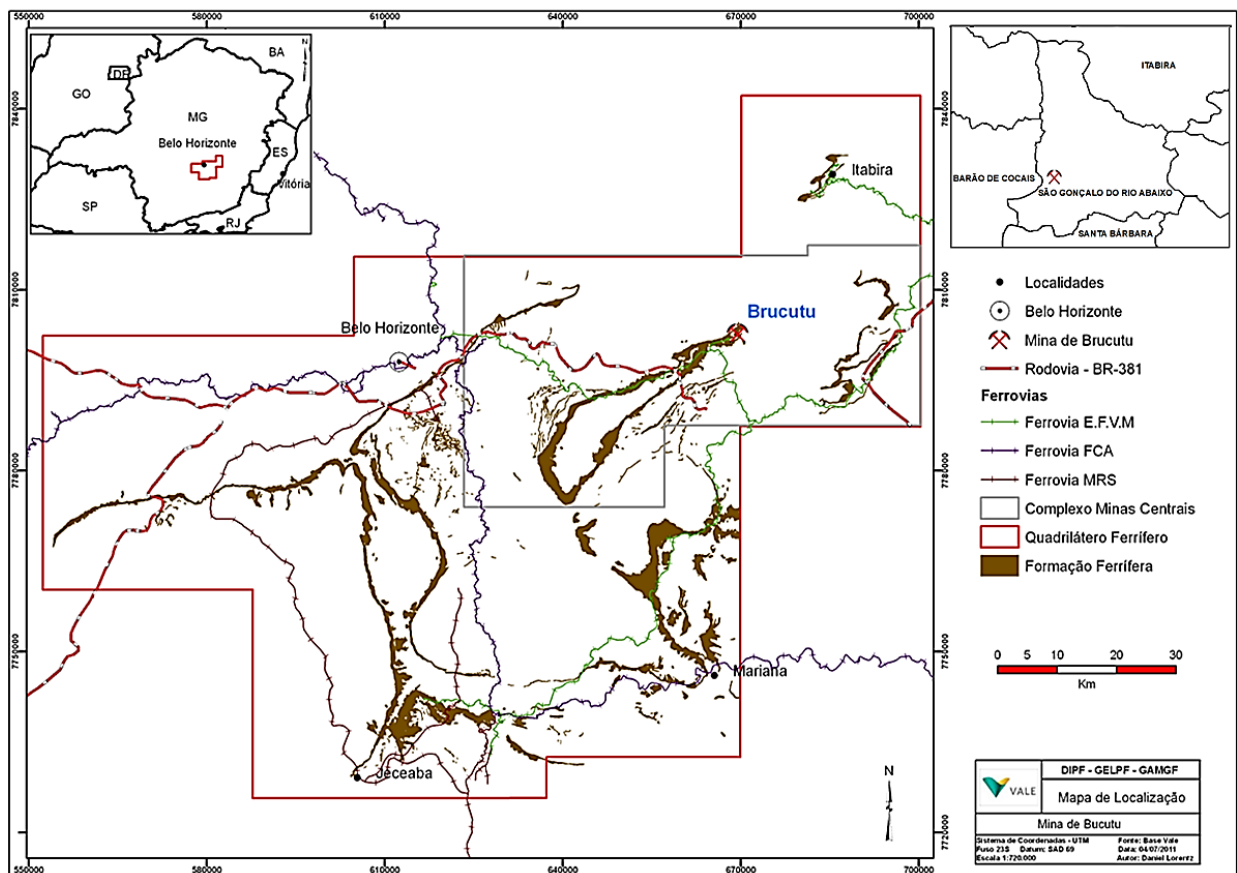


Figura 21. Mapa de localização da área de estudo no âmbito do Quadrilátero Ferrífero. Fonte: Vale S.A. (2018).

A mina de Brucutu está localizada no Quadrilátero Ferrífero (QFe), estado de Minas Gerais, sudeste do Brasil, onde são lavrados corpos de minério de ferro de alto teor, compactos, semi-friáveis e friáveis, além de itabiritos enriquecidos, todos hospedados na Formação Cauê do Supergrupo Minas (RENGER et al. 1994). A mina de ferro de Brucutu possui atualmente profundidade de 260 m, estando atualmente entre as cotas 790 e 1050m. Os taludes possuem

10 m de altura e inclinação que varia de 27 a 40°. Estes taludes estão projetados em porções de solos saprolíticos e rochas intensamente intemperizadas e fraturadas. Segundo Lume (2012) as principais condicionantes de instabilidades nos taludes na mina de Brucutu são a presença de estruturas geológicas, litotipos de baixa qualidade geomecânica, além de surgências do lençol freático.

Na década de 1970 a mina de Brucutu teve sua exploração iniciada pelo consórcio entre a Mineração Santa Mônica e a Mineração Caemi. Nesta época, o único produto gerado era o *sinter feed* natural (fino comum) oriundo de um *Run Of Mine* (ROM) majoritariamente composto por hematititos. Em 1985 a mineração Santa Mônica e Caemi arrendaram a mina de Brucutu para a empresa Socoimex, que manteve as atividades no local até 1994. Em 1995, a Vale S.A. obteve a detenção das operações em Brucutu (VALE S.A., 2017). A Figura 22 mostra a vista panorâmica atual da mina de Brucutu.



Figura 22. Visão panorâmica aérea com visada de SE para NW da mina de Brucutu na data de 24/05/2019. Fonte: Vale S.A., (2019).

A área da cava da Mina de Brucutu compreende um polígono de aproximadamente 2,57 km de largura por 4,45 km de comprimento. A cava foi setorizada em regiões para facilitar a

localização das áreas conforme indicado na Figura 23. A área de estudo se encontra na região do GW nas cotas 1.030 a 1.000 m.

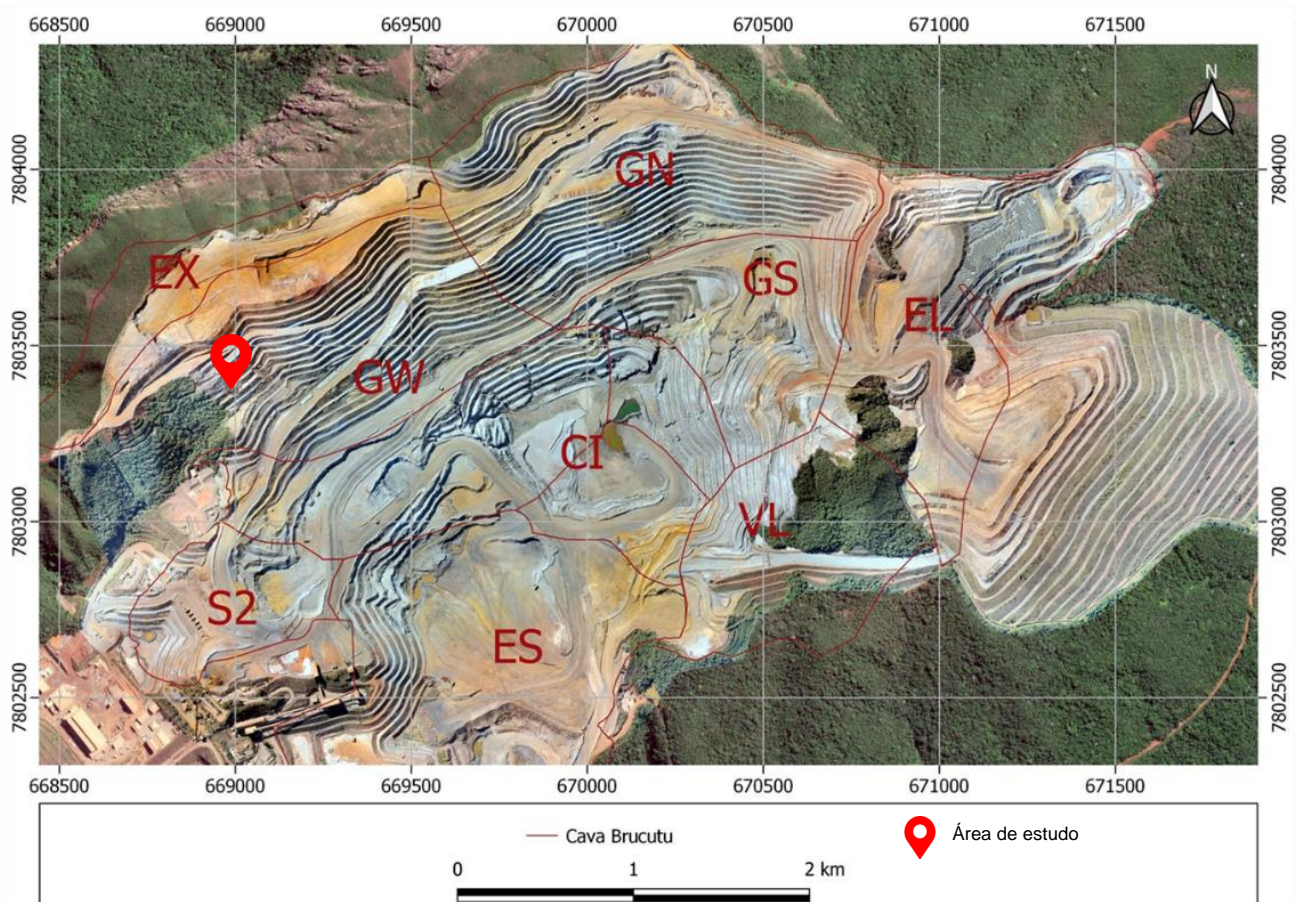


Figura 23. Mapa dos setores da mina de Brucutu, com indicação da área de estudo (vermelho): EX (Extremo Oeste), GN (Gralhos Norte), GW (Gralhos West), GS (Gralhos Sul), EL (Extremo Leste), VL (Vargem da Lua), ES (Extremo Sul), CI (Centro Interno) e S2.

4.2 Aspectos geológicos e estruturais

Aspectos geológicos

O depósito de Ferro da mina de Brucutu está hospedado na Formação Cauê, Grupo Itabira, Supergrupo Minas e repousa no contato tectônico com a sequência vulcanossedimentar do Grupo Nova Lima pertencente ao Supergrupo Rio das Velhas. Ao Norte, as falhas das Cambotas empurram as rochas supracrustais sobre o Complexo Granito-Gnáissico de Cocais que representam os Complexos Metamórficos (DORR 1969, ALMEIDA et al. 2003, ENDO 2003, ENDO et al. 2004a, ENDO et al. 2005, ENDO *et al.*, 2019a).

Segundo Endo et al. (2004a) e Endo et al. (2008) a área da mina de Brucutu caracteriza-se pela presença de rochas pertencentes às seguintes unidades litoestratigráficas:

Embasamento

O Gnaisse Santa Bárbara e Gnaisse Cocais compreendem gnaisses de composição tonalítica-granodiorítica, em geral migmatizados em diferentes graus. O bandamento gnáissico é caracterizado por bandas leucocráticas centimétricas, descontínuas sendo constituídas predominantemente por quartzo e feldspato e por lâminas mesocráticas ricas em minerais máficos, especialmente biotita. Possui direção NE-SW e mergulhos moderados para SE. Estas unidades constituem o embasamento para as sequências dos supergrupos Rio das Velhas e Minas.

Supergrupo Rio das Velhas

O Grupo Nova Lima nas proximidades da mina de Brucutu compreende clorita xistos e intercalações de xistos e filitos ferruginosos e raramente quartzitos sericíticos.

Supergrupo Minas

Compreende o Grupo Tamanduá, Grupo Itabira e Grupo Piracicaba. O Grupo Tamanduá compreende os quartzitos e clorita quartzo xisto, subjacentes à Formação Cauê, Formação Cambotas e a Formação Morro Grande.

A Formação Cambotas é formada essencialmente de quartzitos, quartzo-sericita xistos, metaconglomerados, quartzitos com bandas ferruginosas que afloram junto ao contato inferior da Formação Cauê.

A Formação Morro Grande é constituída essencialmente de clorita-quartzo xisto e sericita-quartzo xisto, em proporções variadas, apresentando coloração variegada em tons róseos e arroxeados, cinza e, por vezes, esbranquiçados. Filitos de coloração cinza ocorrem raramente. Na região da mina de Brucutu, os sericita quartzo xistos e filitos encontram-se em contato abrupto, não tectônico, com os itabiritos da Formação Cauê.

No Grupo Itabira se encontra a Formação Cauê, hospedeira do minério de ferro da mina de Brucutu, com teor de ferro variando de 30 a 60%, em especial nos itabiritos friáveis que

predominam em Brucutu. O Grupo Itabira é composto essencialmente por 1.100 m de rochas metassedimentares marinhas (ALKMIM & MARSHAK, 1998; DORR et al. 1957; DORR, 1969). É constituído por itabiritos, itabiritos dolomíticos, itabiritos anfíbolíticos e, subordinadamente, de filitos, quartzitos e mármore da Formação Cauê. Sendo essa formação sobreposta por mármore dolomítico, filito dolomítico, dolomito ferruginoso, filito e itabirito da Formação Gandarela (DORR, 1958, SPIER et al. 2007).

A Formação Cauê constitui-se essencialmente por itabiritos e corpos de hematita compacta. A Figura 24 exhibe o empilhamento estratigráfico das unidades aflorantes na mina de Brucutu (VALE S.A., 2019). As hematitas podem ser classificadas em: compactas, friáveis, aluminosas, goethíticas, anfíbolíticas ou manganésíferas. Os itabiritos são classificados em: friáveis, compactos, aluminosos, goethíticos, anfíbolíticos e dolomíticos.

O Grupo Piracicaba constitui-se basicamente de quartzitos ferruginosos, xistos e filitos carbonosos, talco xistos e sericita xisto. Distribuem-se ao longo de uma faixa de direção NE-SW com espessura diminuindo de SW para NE (ENDO et al., 2008).

Era				Código	Litologia
Quaternário / Terciário				SO	Solo
				CG	Canga
Orogênese Brasileira (650 a 560 Ma)					
	Intrusivas			IN	Intrusiva
	Granito Peti			GP	Granito Peti
Orogênese Transamazônica (2.250 a 1900 Ma)					
Era	Supergrupo	Grupo	Formação	Código	Litologia
Paleoproterozóico	Minas	Piracicaba		QTP	Quartzito Piracicaba
			Itabira	Cauê	IMN
		HF			Hematita friável
		HC			Hematita compacta
		HAL			Hematita aluminosa
		HGO			Hematita goethítica
		HÁ			Hematita anfíbolítica
		HMN			Hematita manganésífera
		IF			Itabirito friável
		IC			Itabirito compacto
		IAL			Itabirito aluminoso
		IGO			Itabirito goethítico
		IA			Itabirito anfíbolítico
		IDO			Itabirito dolomítico
			Tamanduá	Morro Grande	XI
		Cambotas	QTT	Quartzito Tamanduá	
Arqueano	Rio das Velhas	Nova Lima		XIRV	Xisto Nova Lima
	Embasamento - Gnaiss Cocais			GC	Gnaiss Cocais

Figura 24. Empilhamento estratigráfico das unidades aflorantes na mina de Brucutu. Fonte: Vale S.A., (2019).

Rochas Intrusivas pós-Minas

As litologias desta unidade possuem composição ultramáfica formada por piroxenitos intemperizados, talco xistos, por vezes com porções anfibolíticas. O Granito Peti são granitos foliados contendo quartzo, plagioclásio e biotita.

Cenozoico

A Formação Cata Preta representa sedimentos argilosos de coloração avermelhada, contendo rochas ferruginosas (e.g canga). A unidade registra duas gerações distintas de sedimentação de sedimentos argilosos e desenvolvimento de cobertura de canga entre elas.

A Figura 25 apresenta o mapa litológico da cava. Foram mapeados quinze litotipos seguindo critérios de classificação que se basearam em seus componentes mineralógicos, texturais, características físicas e químicas.

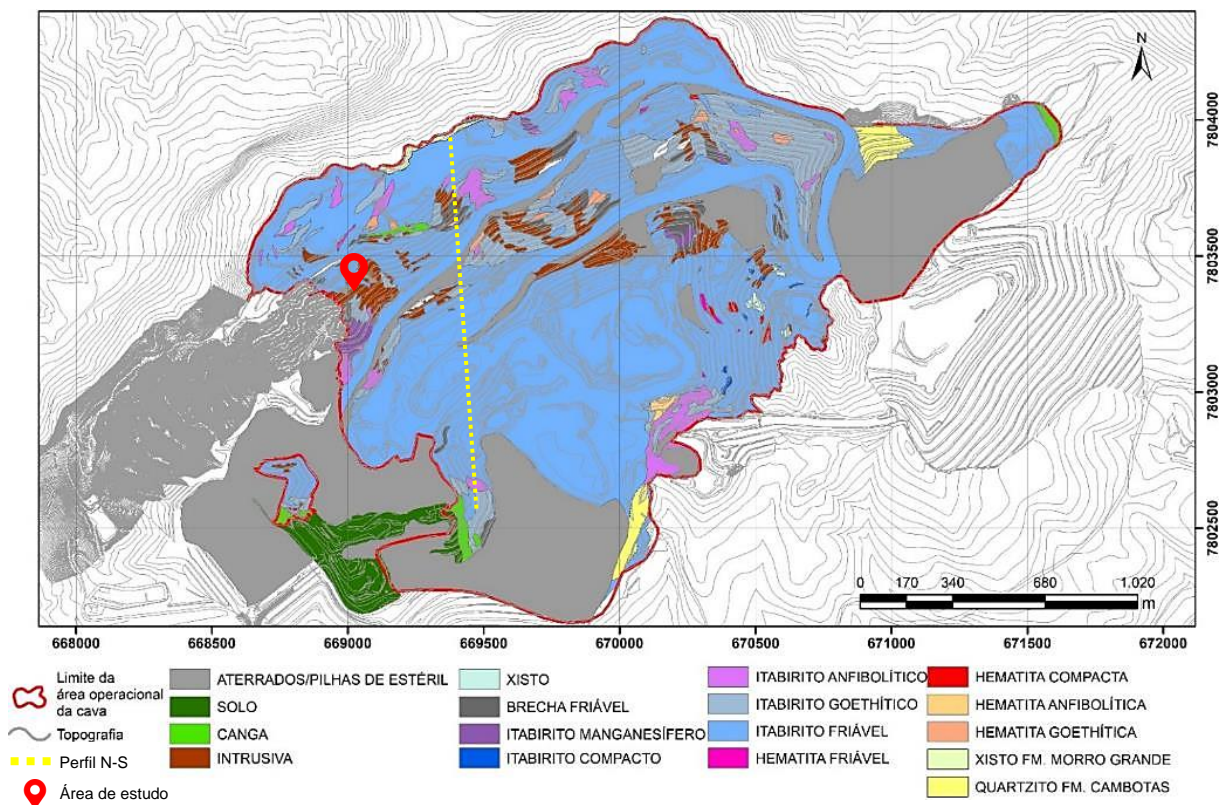


Figura 25. Mapa litológico da cava da mina de Brucutu, com indicação da área de estudo e perfil N-S mostrado na Figura 26 (linha tracejada amarela). Fonte: Walm, (2021).

Na Figura 26 é possível observar que a mina está instalada em um sinclinal assimétrico com vergência para norte, que contém expressivos depósitos de minério de ferro associados as unidades de itabirito friável, anfibolítico, compacto e manganesífero.

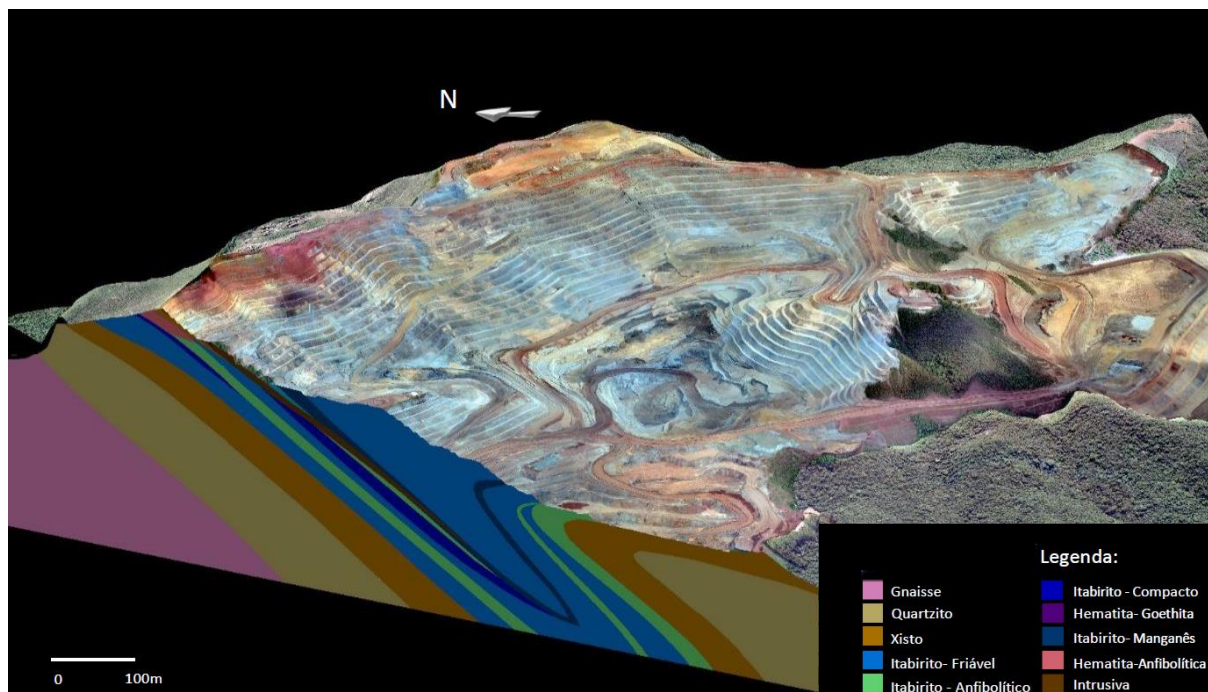


Figura 26. Seção geológica N-S da mina de Brucutu. Fonte: Adaptado de ANGELI, (2011).

Aspectos estruturais

O acervo estrutural na cava da mina de Brucutu mostra a superposição de quatro fases de dobramento (F1, F2, F3 e F4). Este processo representa a distribuição quase uniaxial dos pólos dos planos dos acamamentos dos itabiritos na cava de Brucutu. Os pólos de S0 da Figura 27A apresentam uma dispersão cônica ao invés de uma distribuição em guirlanda. O eixo do cone possui atitude quase subvertical reforçando o caráter multidirecional do encurtamento tectônico, que no caso seriam as seguintes direções: ENE-WSW (F2), NW-SE (F3) e NE-SW (F4). Este comportamento pode ser verificado também na baixa dispersão dos polos da xistosidade S2 (Figura 27B) (ENDO et al., 2008).

Na maior parte da cava da mina de Brucutu, o *trend* geral do acamamento dos itabiritos é na direção preferencial ESE-WNW (Figura 27A) e com inflexão para direção submeridiana na porção oriental da cava (ENDO et al., 2008).

As falhas normais de direção EW mais expressivas e com rejeito maior formam um sistema de *grábens* e *horts* na porção norte da cava de Brucutu preenchido por sedimentos avermelhados com características de fluxo de detritos (ENDO et al., 2008).

Em relação ao acervo estrutural externo à cava de Brucutu, os elementos lineares sofreram rotação anti-horária de pelo menos 30° resultado do efeito da fase de dobramento F4 ou da superposição de F3 + F4. As lineações minerais, de intersecção e eixos de dobras apresentam caimentos para ENE a NE (Figuras 27 C, D e E) (ENDO et al., 2008).

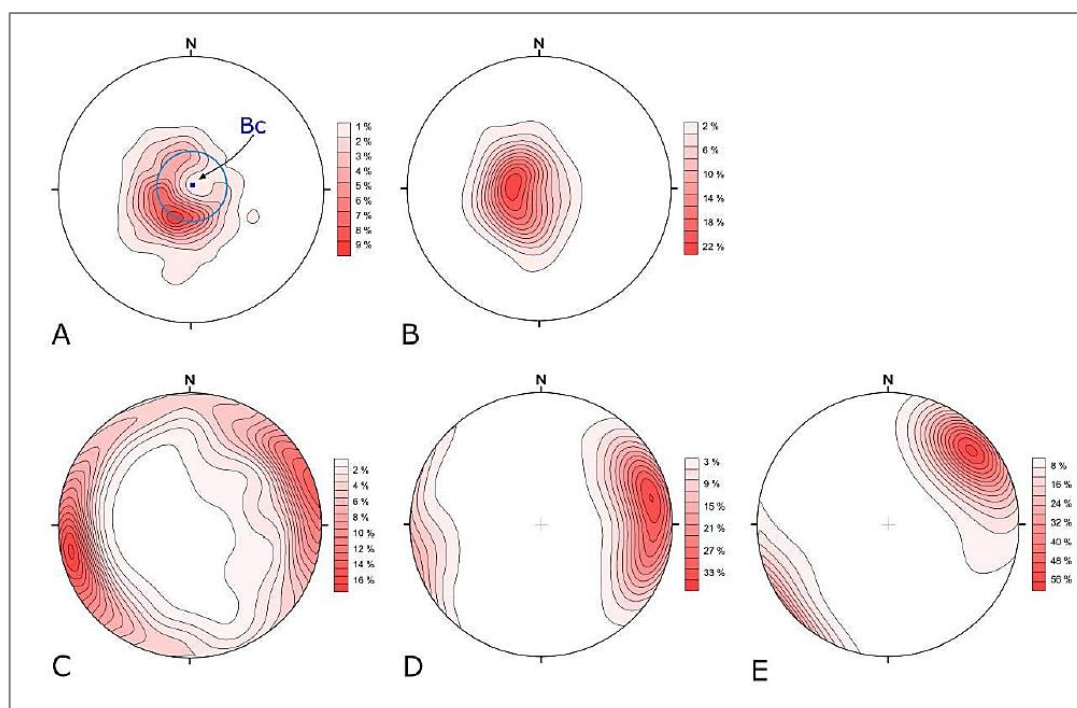


Figura 27. Estereogramas de tectonitos “S” e “L” na cava da mina de Brucutu: A – Acamamento, N=617, Máx. 030/20 (9,41%), Bc=010/83 (eixo do cone); B – Xistosidade S2, N=202, Máx. 091/26 (23,07%); C – Eixos de dobra B2, N=121, Máx. 257/09 (16,80%); D – Lineação de intersecção L2, N=87, Máx. 076/15 (35,76%); E – Lineação mineral, N=64, Máx. 0050/17 (56,75%). Fonte: Endo et al., (2008).

As feições estruturais de maior destaque na cava Brucutu e presente nos vários litotipos são:

- i. Acamamento representado por alternância na composição e constituição mineralógica ou texturas conformando as bandas do litotipo. Esse aspecto é notado principalmente nos itabiritos que constituem a cava;

- ii. Foliação dada pela disposição planar de componentes minerais com formas placoides, achatadas ou prismáticas. Notado principalmente nos xistos, quartzitos e rochas metabásicas, por vezes nota-se a presença de foliação em hematititos;
- iii. Lineação de estiramento e mineral, lineação de crenulação e lineação de eixo de dobra presentes em praticamente todos os litotipos citados anteriormente;
- iv. Descontinuidades, juntas, fraturas e clivagens, permeiam todos os litotipos encontrados na mina, com maior expressão nas rochas mais resistentes.

Foliação

A foliação e o bandamento (Figura 28) são pervasivos nos vários litotipos: (i) bandamento dado por bandas de constituição e texturas diferentes, de espessuras milimétricas a centimétricas; (ii) xistosidade, demarcada pela disposição planar de componentes minerais de forma placoides, achatados ou prismáticos. No geral, estas feições foram paralelizadas pelos processos tectônicos e são referidas conjuntamente como foliação (Sn).

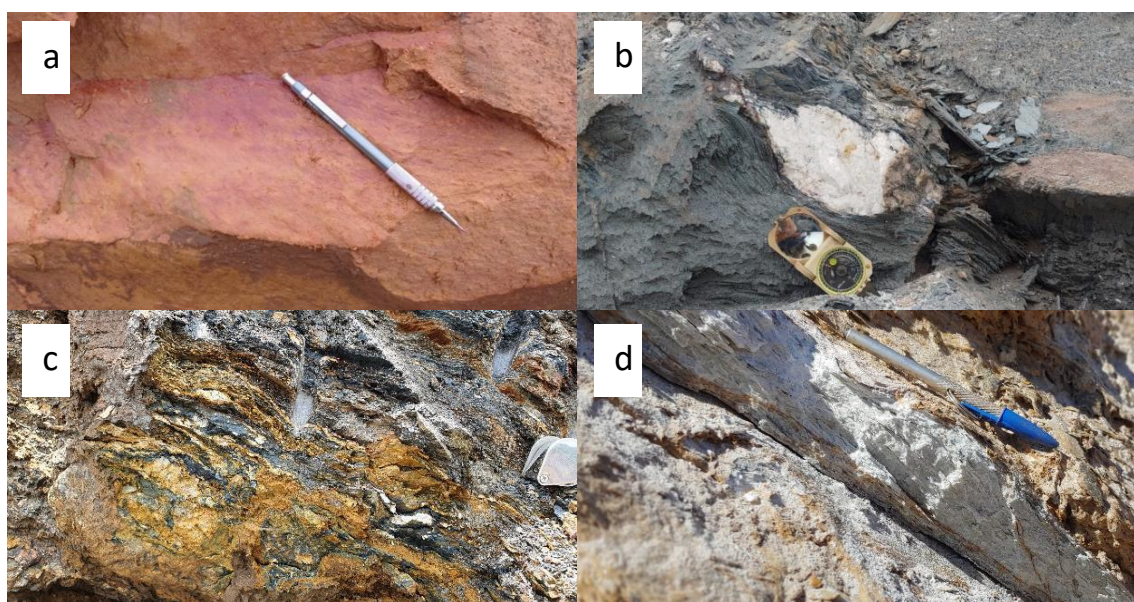


Figura 28. Exemplos de foliação observados na cava da mina de Brucutu: A) Xistosidade na intrusiva, formada por minerais micáceos; B) Lente de quartzo no itabirito friável; C) Foliação milonítica na brecha friável; e D) Xistosidade no quartzo-muscovita xisto. Fonte: Walm, (2021).

As foliações levantadas na área de estudo na região do GW na cava da mina de Brucutu, apresentam plano preferencial dado pela maior concentração em torno de $137/32$, podendo ser correlacionada com a fase de deformação tectônica F4 (Figura 29).

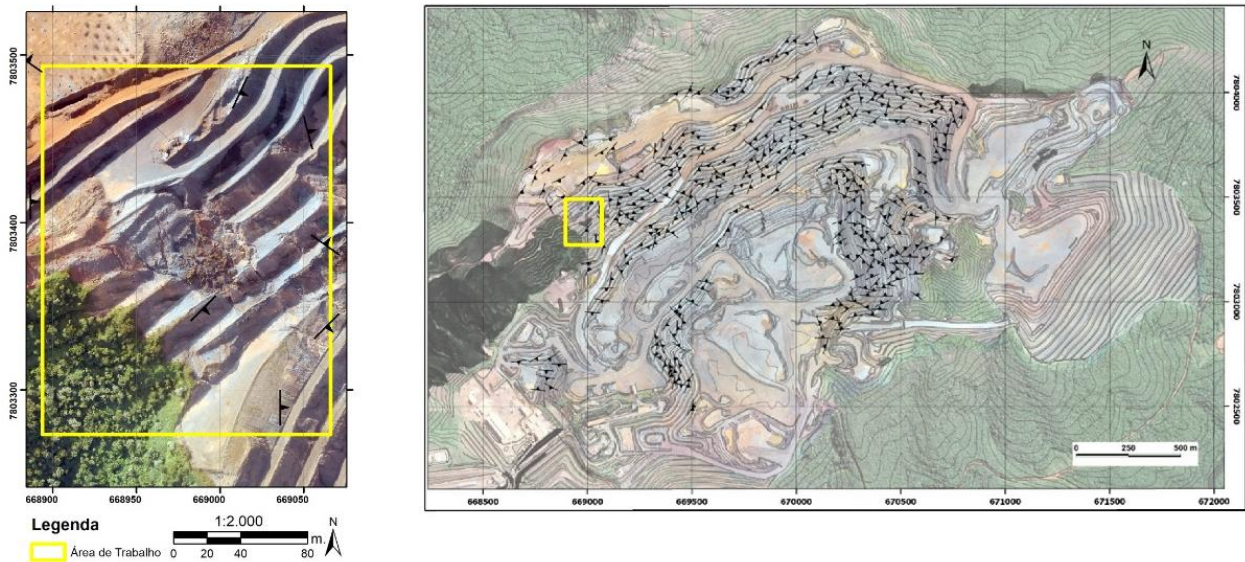


Figura 29. Mapa de medidas de foliação na área da cava da mina de Brucutu, com destaque para a área de estudo. Fonte: Adaptado de Walm, (2021).

Lineação

No plano da foliação existe uma lineação de estiramento mineral, representada por grãos e agregados de grãos alongados segundo a direção de maior alongação (eixo X do elipsóide de deformação), em decorrência do fluxo plástico; e uma lineação de crescimento mineral, representada por grãos que se desenvolveram por recristalização metamórfica, adquirindo forma alongada. Estas duas lineações, presentes ao longo de toda a mina dispõem-se em geral paralelamente e são referidas conjuntamente como lineação de estiramento (Le) (Figura 30).

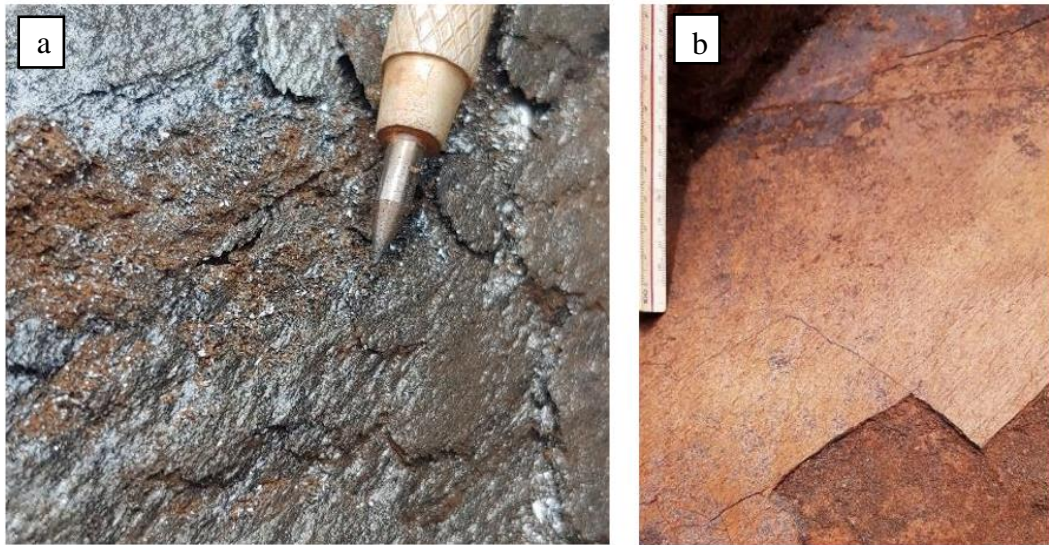


Figura 30. Exemplos de lineação de estiramento mineral observadas na cava da mina de Brucutu: A) alinhamento preferencial dos cristais de especularita no itabirito compacto; B) estiramento e alinhamento preferencial dos cristais de pseudomorfos de anfibólio nos itabiritos anfibolíticos. Fonte: Walm, (2021).

A lineação de estiramento assume uma atitude geral de $084/26$ atribuindo à deformação dúctil não coaxial, uma natureza de cisalhamento oblíquo ao movimento dos corpos rochosos, com movimentação geral de ESE para WNW. A Figura 31 retrata o mapa de distribuição das lineações de estiramento.

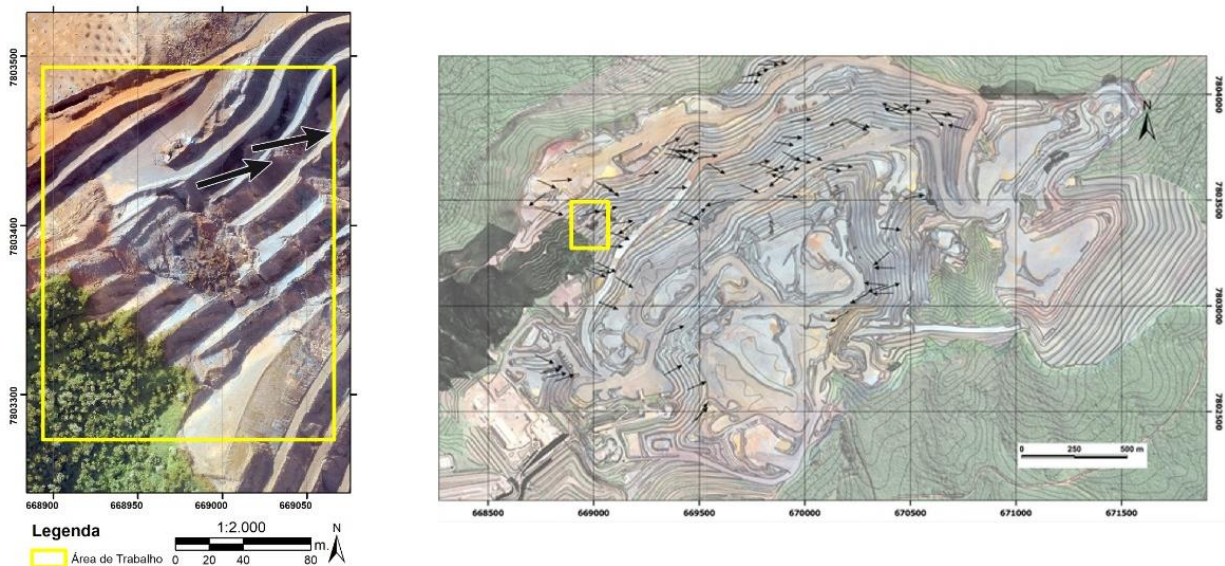


Figura 31. Mapa de distribuição das lineações de estiramento mineral, com destaque para a área de estudo. Fonte: Adaptado de Walm, (2021).

Fraturas

As fraturas (Fr) ocorrem seccionando os diversos litotipos. Essas fraturas compõem famílias de superfícies planares que se apresentam entrecruzadas e possuem características distintas ao longo da cava. Apesar de mais perceptíveis nas rochas compactas, as fraturas também se apresentam nos litotipos classificados como friáveis. Foram identificadas quatro famílias principais de fraturas de alto mergulho, designadas como Fr1, Fr2, Fr3 e Fr4 (Figura 32).

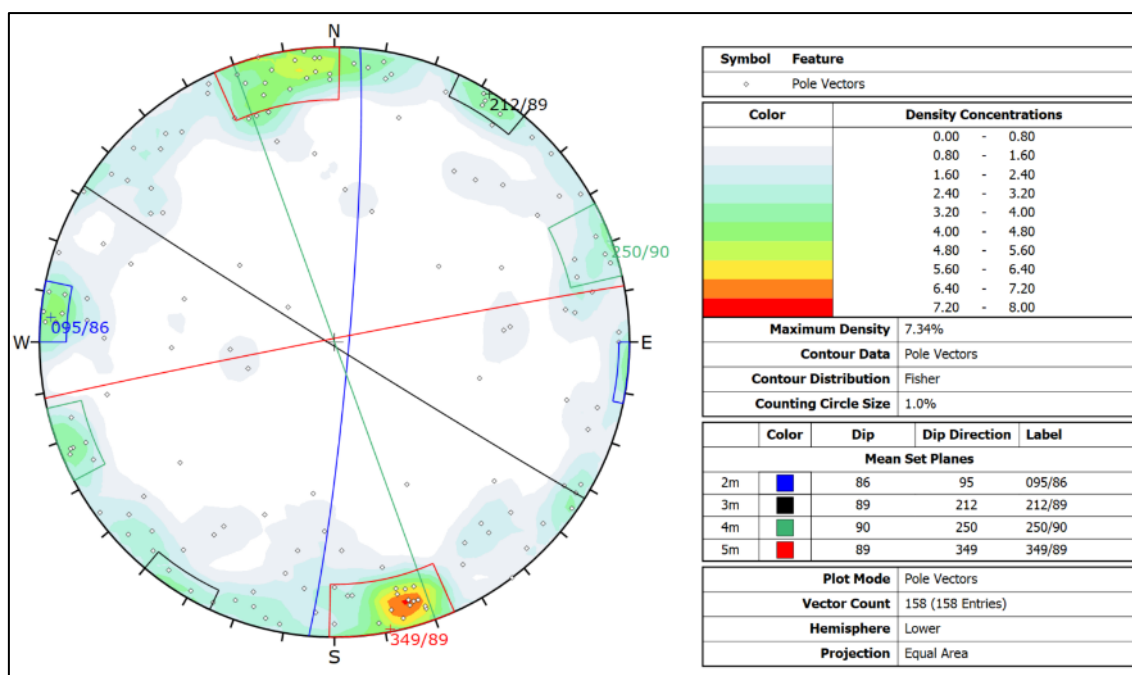


Figura 32. Estereograma dos pólos de fraturas identificadas na cava da mina de Brucutu (Diagrama Schmidt-Lambert). Fonte: Adaptado de Walm, (2021).

4.3 Aspectos geomecânicos

A Figura 33 retrata o mapa de classes geomecânicas da cava atual da mina de Brucutu (WALM, 2021). Na área de estudo, predominam materiais de baixa resistência mecânica (*weak rock*), o que configura maciços compostos por saprolito e litotipos friáveis e/ou intemperizados. Esta classe de maciço ocorre em todos os litotipos friáveis, com maior relevância aos Itabiritos Friáveis (IF), Itabiritos Anfíbolíticos Friáveis (IANF) e Intrusivas Friáveis (INF) (WALM, 2021). Além disso, esta classe de maciço comporta lentes de rochas:

- Extremamente brandas (*Extremely Weak*) correspondem aos materiais extremamente brandos, ou R0 cuja faixa de resistência varia de 0,25 a 1MPa.
- Muito brandas (*Very Weak*) correspondem aos materiais classificados como muito brando inferior, ou R1- cuja faixa de resistência varia de 1 a 3 MPa.
- Classe III - maciços geotecnicamente regulares. Consistem em maciços rochosos moderadamente fraturados (F3) a fragmentados (F6), com predominância de graus de alteração de intensamente alterados (W4) a levemente alterados (W2), medianamente resistentes (R3) a muito resistentes (R5).
- Classe IV- São solos lateríticos, contendo por vezes vegetação, apresentam-se muito alterados, com resistência R0 e grau de intemperismo W6.

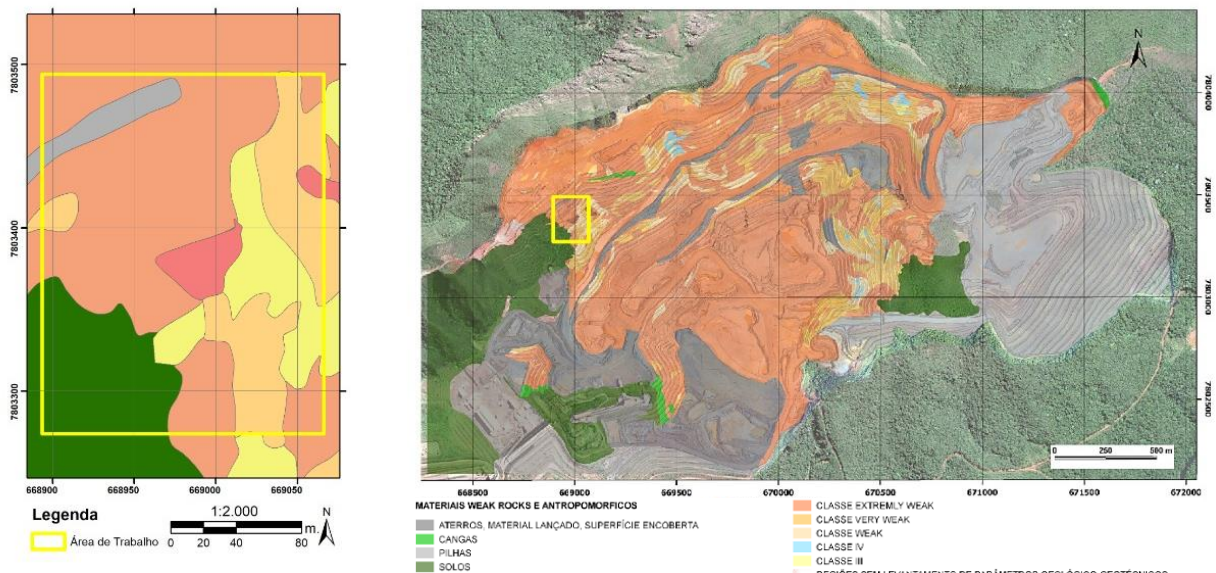


Figura 33. Mapa de classes geomecânicas para a cava da mina de Brucutu, com destaque para a área de estudo. Fonte: Adaptado de Walm, (2021).

4.4 Aspectos hidrogeológicos

Conforme disposto no estudo hidrogeológico da mina de Brucutu realizado pela empresa MDGEO em 2021, as unidades hidrogeológicas existentes na mina são: sistema aquífero granito-gnáissico, aquífero Nova Lima, aquífero Tamanduá, aquífero Cauê, aquífero Cercadinho, aquífero de rochas intrusivas e aquíferos superficiais (MDGEO, 2021).

Sistema Aquífero Granito Gnáissico (SAGG)

Essa unidade engloba as rochas gnáissicas e graníticas, constituindo o embasamento para as sequências dos Supergrupos Rio das Velhas e Minas, sendo representado pelas rochas gnáissicas do complexo metamórfico Gnaiss Cocais e pelo Granito Peti.

As rochas gnáissicas constituem aquíferos fraturados com porosidade secundária, onde a circulação de água somente se faz através de seu sistema de discontinuidades rochosas, fraturas, falhas e são, quando sãs, praticamente desprovidas de porosidade intersticial.

Em regiões de clima úmido, essas rochas são geralmente alteradas, constituindo o manto de alteração, que apresenta espessuras variadas que podem chegar a dezenas de metros e é constituído por um material granular de porosidade primária. Estes solos formados no manto de alteração permitem a infiltração de água e a alimentação do sistema aquífero fraturado.

Sistema Aquífero Nova Lima (SANL)

Assim como o SAGG, o SANL é formado por dois tipos de aquíferos:

- Aquífero inferior fraturado: descontínuo, anisotrópico, heterogêneo, geralmente livre, as vezes confinado. Este aquífero é composto por rochas xistosas, formando o aquífero xisto e pelas rochas quartzíticas ferruginosas que formam os aquíferos das formações ferríferas;
- Aquífero superior poroso: O segundo tipo ocorre no manto de alteração, causado pelo intemperismo das rochas xistosas e pelíticas, sendo um aquífero do tipo granular. Possui espessura variando de 10 a 20 metros.

Devido à cobertura do manto ser essencialmente argilosa, o sistema fissural sotoposto constitui um aquífero, alimentado por uma baixa taxa de infiltração. Desta maneira, apresenta baixa capacidade de regularização de água subterrânea.

Sistema Aquífero Tamanduá (SAT)

Este sistema é formado pelos quartzitos da Formação Cambotas e pelos xistos da Formação Morro Grande. As rochas quartzíticas formam o Aquífero Cambota e os xistos formam o Aquífero Morro Grande (AMG), ambos com porosidade secundária, ou seja, fraturados.

O manto de alteração sobreposto às rochas xistosas é essencialmente argiloso dificultando a infiltração e alimentação do aquífero abaixo. Já o manto gerado pelas rochas

quartzíticas, forma um solo mais arenoso facilitando a infiltração e alimentação do aquífero quartzítico abaixo.

Sistema Aquífero Cauê

É reconhecidamente o principal reservatório de água subterrânea de todo o Quadrilátero Ferrífero, sendo constituído pelas hematitas e itabiritos da Formação Cauê. Predominam amplamente os itabiritos que são descritos predominantemente como compactos ou friáveis, de acordo com suas características físicas, e silicosos, anfíbolíticos e dolomíticos pelas suas características químicas. As hematitas ocorrem secundariamente e, também, recebem as denominações de hematitas compactas ou friáveis. Os itabiritos e hematitas friáveis se comportam como meio granular, enquanto as hematitas e itabiritos compactos possuem um comportamento semelhante ao dos aquíferos fissurais.

O Aquífero Cauê é, em geral, do tipo livre¹ e varia desde fracamente heterogêneo e pouco anisotrópico em áreas de predominância de itabiritos friáveis, até fortemente heterogêneo e anisotrópico em regiões de intercalações com hematitas compactas. É frequente a presença de corpos de rochas intrusivas impermeáveis, que localmente podem causar pequenos confinamentos, mas cuja principal ação é promover a compartimentação do aquífero em blocos muitas vezes totalmente estanques.

Os parâmetros hidrodinâmicos do aquífero Cauê são bastantes variáveis. Diversos ensaios em diferentes regiões do Quadrilátero Ferrífero mostraram valores de transmissividade de 5,0 a 1500 m²/dia.

De acordo com dados existentes da região do Quadrilátero Ferrífero, estima-se para o Aquífero Cauê uma condutividade hidráulica na ordem de 1 m/dia possivelmente variando de 0,1 a 3 m/dia. Os valores mais elevados são atribuídos as hematitas e itabiritos alterados, e menores valores para os itabiritos compactos e anfíbolíticos.

Sistema Aquífero Cercadinho

Este sistema é formado pelos quartzitos da Formação Cercadinho, do Grupo Piracicaba. São fraturados, descontínuos, anisotrópicos, heterogêneos e livres, mas podem ser encontrados também confinados pelo aquícluído formado pelos filitos da Formação Cercadinho.

¹ Podem, no entanto, ter caráter de aquífero confinado quando mergulham e são recobertos por dolomitos ou, em situações de flancos invertidos, recobertos pelos filitos.

Sistema Aquífero de Rochas Intrusivas

As rochas intrusivas constituídas por gabros e diabásios, formam um sistema que em superfície apresenta um manto de alteração argiloso, e em profundidade constitui um sistema fraturado em que a percolação de água, ocorre através das descontinuidades.

Devido à natureza argilosa do solo originado no manto de alteração, a cobertura destas rochas se comporta como aquíferos e aquícludes, de maneira que a alimentação do sistema fraturado subjacente quase não ocorre.

Quando este sistema apresenta poucas falhas/fraturas, as rochas muitas vezes funcionam como barreiras hidráulicas, compartimentando os demais sistemas aquíferos, impedindo a passagem de fluxo entre eles. As barreiras hidráulicas formam os aquíferos suspensos e confinados.

Sistema Aquífero Superficial

Estes sistemas são constituídos pelos vários tipos de coberturas ocorrentes na área, como cangas e solos. Correspondem a aquíferos granulares, livres, descontínuos, muito heterogêneos e anisotrópicos, com boa capacidade de armazenamento de água subterrânea. Os solos aparecem por grande parte da área de estudo e recobrem os vários sistemas aquíferos. Desta maneira, esta unidade aquífera serve como receptor da chuva incidente por grande parte da área.

A canga aparece mais na aba norte da sinclinal, apresentando-se como material detrítico e fragmentado (alóctone), porém podem ocorrer in situ ou com pequeno transporte (autóctone), com os fragmentos da própria formação ferrífera, cimentados por hidróxidos de ferro. Desta forma, constitui um material com alta permeabilidade e porosidade, que tem importante função de alimentar o Aquífero Cauê subjacente a elas.

A Figura 34 mostra o aquífero regional, com as linhas equipotenciais variando entre 900 e 730 metros. As equipotenciais de maiores cotas são observados na aba norte da sinclinal, diminuindo em direção a região da cava, ou seja, apresentando um fluxo de direção W-E. Na área mais afastada da cava, na parte sudoeste do mapa, a direção de fluxo é no sentido sudeste, diminuindo da aba norte da sinclinal, em direção a aba sul. A linha de nível d'água apresentada na Figura 35 representa o nível d'água da formação ferrífera em equilíbrio, não havendo variações entre períodos chuvoso e seco.

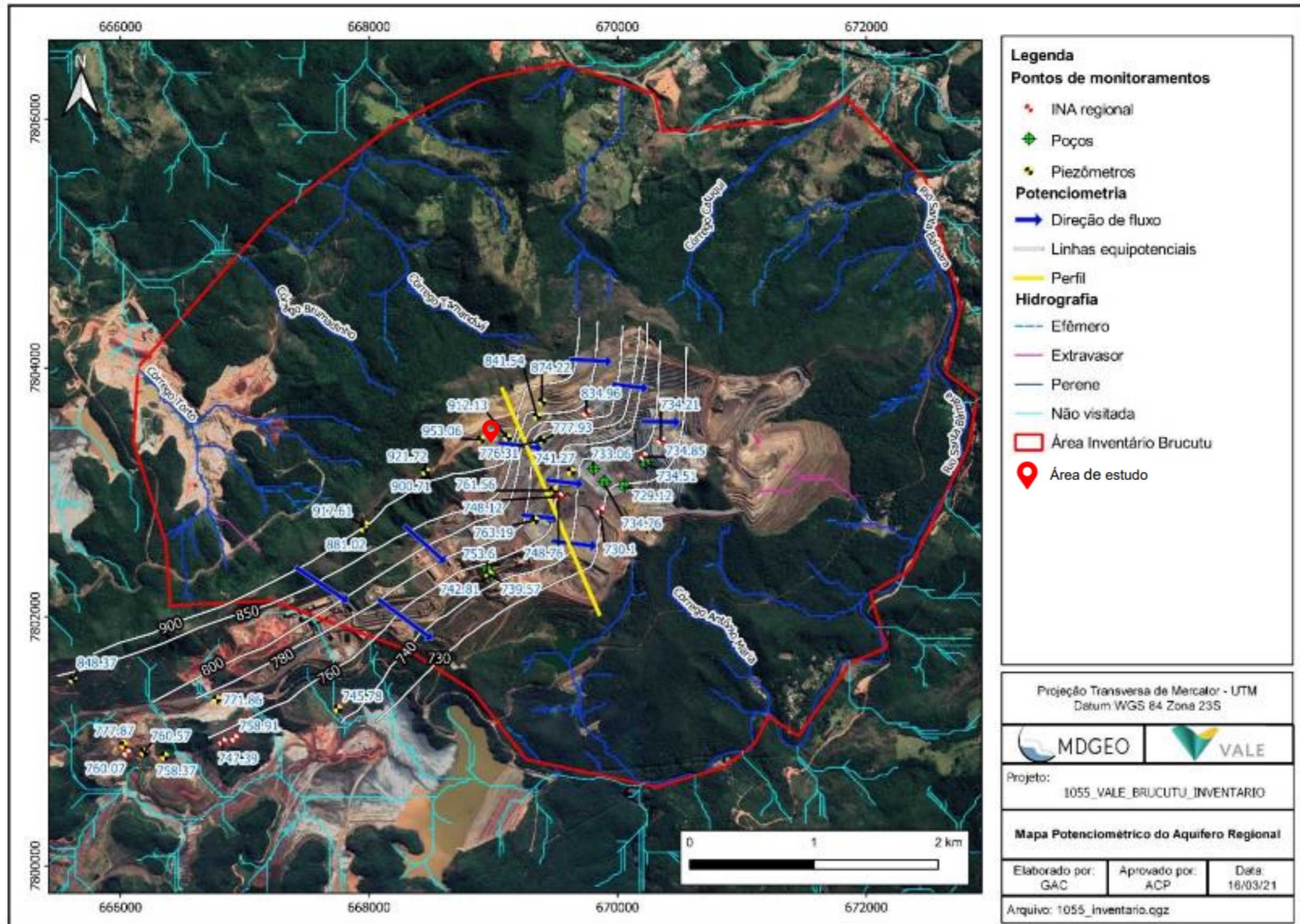


Figura 34. Mapa potenciométrico da mina de Brucutu. Fonte: Adaptado de MDGEO, (2021).

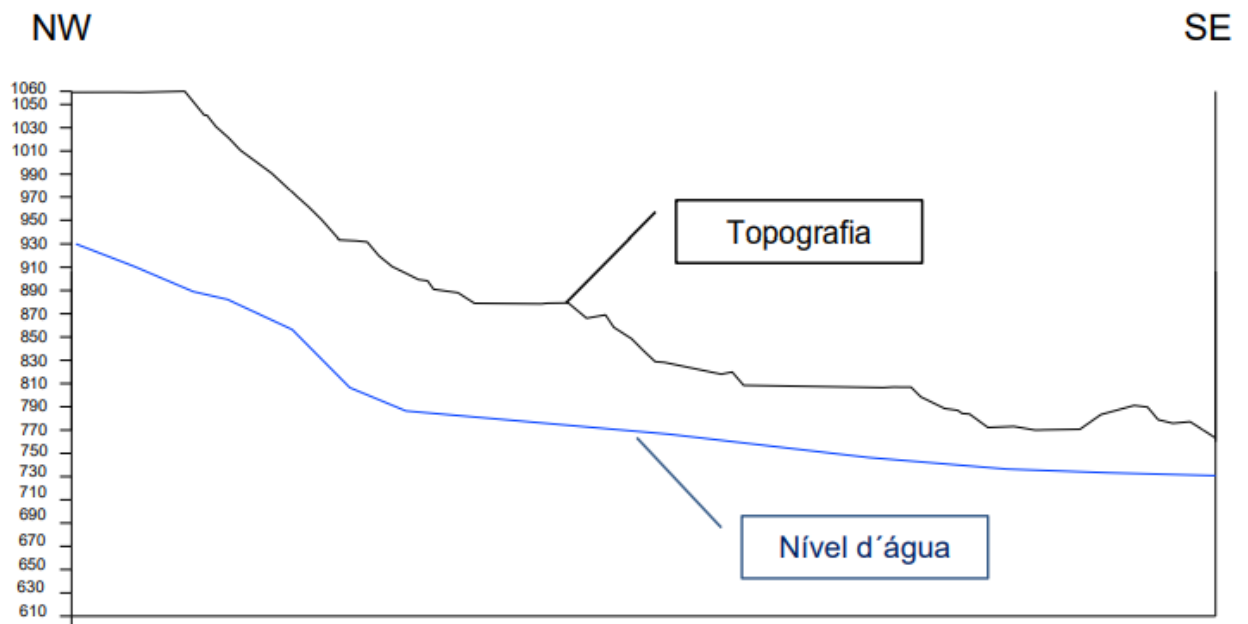


Figura 35. Perfil vertical do nível d'água da formação ferrífera na mina de Brucutu, conforme indicado na figura anterior. Fonte: Adaptado de MDGEO, (2021).

5. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho foram utilizados os seguintes materiais:

- a) Nuvem de pontos (PS) gerado a partir de 85 imagens de radar complexas do satélite COSMO-SkyMed (CSK) em modo *StripMap*, órbita ascendente, banda X e polarização HH, para o período de junho de 2018 a novembro de 2020. Os dados foram processados por meio de uma variante da técnica PSI (Constantini et al. 2009), pela empresa Telespazio Brasil, através do contrato com a Vale S.A. Para informações sobre as características da constelação de satélites CSK e modos de aquisição, consultar ESA (2021);
- b) Software QGIS (versão 3.4 Madeira) para integração dos dados em ambiente SIG, geração de mapas e gráficos. O sistema de coordenadas adotado foi o UTM (Zona 23) e o *Datum* horizontal o SIRGAS 2000;
- c) Relatórios técnicos internos sobre os aspectos geotécnicos e hidrogeológico da mina;
- d) Dados de pluviometria da estação pluviométrica da mina de Brucutu;
- e) Dados derivados de inspeções de campo e geologia de curto prazo (mapeamento geológico). Os dados de mapeamento geológico-geotécnico da cava Brucutu foram realizados pelos geólogos da empresa WALM Engenharia e Tecnologia Ambiental a partir de março de 2020 com interrupção de 7 meses devido à pandemia de Covid-19 e retorno em outubro, com encerramento em dezembro de 2020. Ao total, foram levantados 1.466 pontos em uma área de aproximadamente 3,25 km². Também foram realizadas inspeções de campo em setembro de 2020 pela equipe de Geotecnia da Vale S.A. com o intuito de verificar o comportamento geotécnico da área de estudo.
- f) Ortoimagens geradas a partir de imagens de VANT. Utilizou-se o equipamento modelo DJI Phantom 4 Pro. As imagens foram processadas no software Pix4Dmapper. Os sobrevoos e o processamento das imagens foram realizados pela equipe de Geociências da Vale S.A. O intuito da utilização destas imagens foi verificar as mudanças na geometria dos taludes.
- g) Dados de deslocamento a partir de radar de campo modelo IBIS FM instalado no setor VL da cava, com varredura dos setores GW, GN e CI. O IBIS-FM move-se ao longo de um trilho linear de 2 m, apresenta resolução de 0,75 m x 4,3 mrad a 1 km de distância, com alcance máximo de 4,5 km. O período de aquisição dos dados do radar terrestre foi

de 02/11/2020 a 30/11/2020, com taxa de aquisição a cada uma hora. Os dados obtidos são utilizados para comparação qualitativa com os resultados do levantamento orbital.

Os deslocamentos superficiais foram analisados a partir da plataforma WebGIS AWARE. As medidas com valores negativos representam afastamento na distância sensor-alvo e os valores positivos o oposto.

A Figura 36 mostra o *footprint* das imagens CSK em modo *stripmap* em órbitas ascendente e descendente para a mina de Brucutu. Foram utilizados apenas produtos gerados pela órbita ascendente (retângulo em verde).

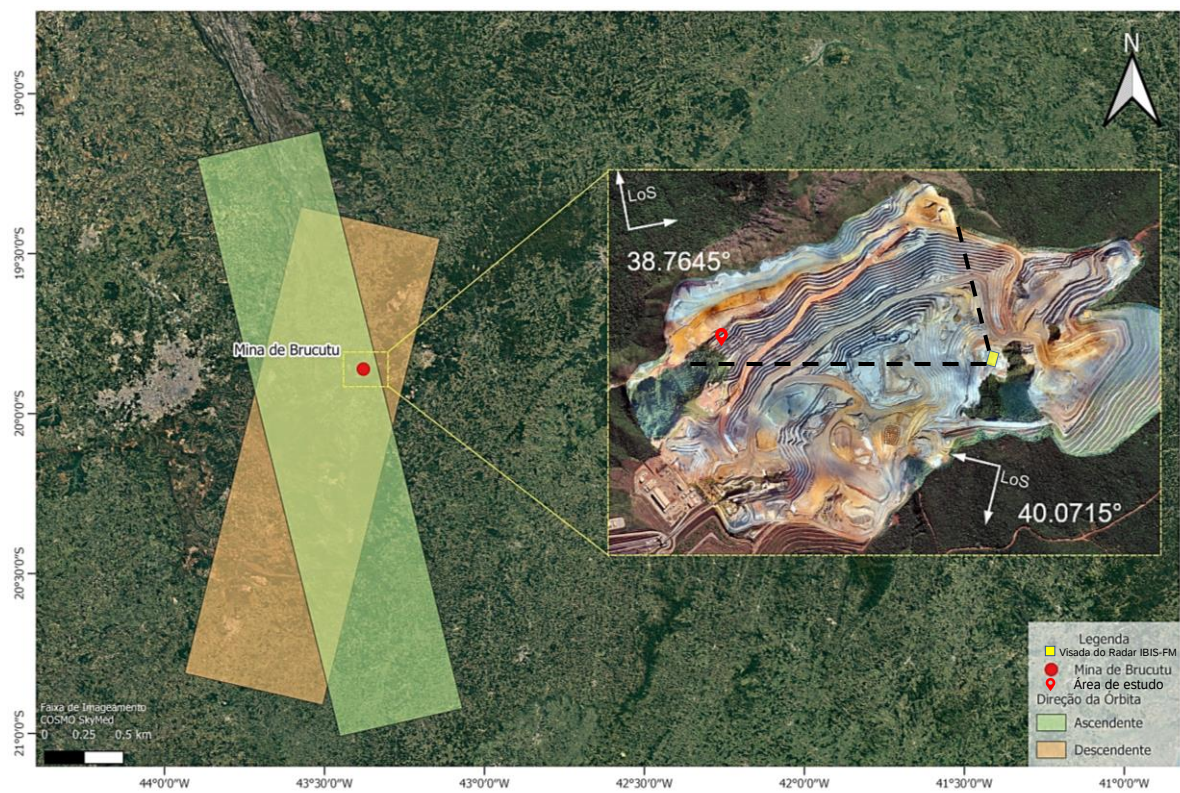


Figura 36. *Footprint* das imagens *stripmap* em órbitas ascendente e descendente para a mina de Brucutu, com indicação dos ângulos de incidência. Fonte: Autor, (2021).

As classes geomecânicas indicadas nos mapas geotécnicos foram definidas conforme Vale (2019), que é uma adaptação da classificação RMR (*Rock Mass Rating*) de Bieniawski (2011), para as condições encontradas na mina (maciços brandos). O significado das classes está ilustrado na Figura 37.

A aplicabilidade pouco eficiente do sistema RMR de Bieniawski (1989) em maciços brandos está relacionada à ampla variedade de comportamento geomecânico e dificuldade de classificar as descontinuidades presentes em maciços da classe V do sistema RMR. Desta forma, para as rochas brandas (*weak rocks*), muito brandas e extremamente brandas foram utilizados os critérios propostos por Martin & Stacey (2018).

As rochas brandas correspondem as faixas de resistência de extremamente branda (R0), muito branda (R1) e branda (R2-), e são subdivididas em três classes:

- Extremamente brandas (*Extremely Weak*) correspondem aos materiais extremamente brandos, ou R0, cuja faixa de resistência varia de 0.25 a 1MPa.
- Muito brandas (*Very Weak*) correspondem aos materiais classificados como muito brando inferior, ou R1-, cuja faixa de resistência varia de 1 a 3 MPa.
- Brandas (*Weak*) correspondem aos materiais classificados como muito brando superior e brando, ou R1+ a R2-, cuja faixa de resistência varia de 3 a 10 MPa.

A classificação de rochas brandas é realizada somente pelo índice de resistência, que pode ser aferida em campo pelas características tátil-visuais, tais como golpe do martelo, risco e raspagem do canivete, risco a unha e pressão manual. A Figura 37 mostra a correlação entre o universo das rochas brandas e rochas coesas em função da resistência à compressão uniaxial.



Figura 37. Sistema de classificação geomecânica utilizada na mina de Brucutu. Fonte: Vale, (2019).

Para a descrição e classificação do grau de intemperismo dos maciços rochosos foi utilizado o sistema de classificação proposto pela *International Society For Rock Mechanics* (ISRM, 1978). Esse sistema consiste na descrição qualitativa do maciço rochoso utilizando como base a análise tátil-visual para inspeção de descoloração das descontinuidades, sinais de oxidação, alteração dos minerais, razão rocha/solo, presença de núcleos de rocha menos

alterada envoltos por material terroso ou muito decomposto, estado de preservação da estrutura do maciço e a desintegração da matriz (Tabela 1).

Tabela 1. Sistema de classificação e descrição do grau de intemperismo de maciços rochosos. Fonte: ISRM, (1978).

Termo	Descrição	Classe
São	Nenhum sinal visível de alteração do material; pode existir alguma leve descoloração nas paredes da descontinuidade principal.	W1
Levemente intemperizado	Descoloração indica alteração da rocha e das descontinuidades. A rocha pode estar toda descolorida e talvez algo menos resistente externamente que a rocha.	W2
Moderadamente intemperizado	Menos da metade da rocha está decomposta e, ou, desintegrada à condição de solo. Rocha sã ou descolorida forma um arcabouço descontínuo ou ocorre como <i>corestones</i> .	W3
Muito intemperizado	Mais da metade da rocha está decomposta e ou desintegrada à condição de solo. Rocha sã ou descolorida forma um arcabouço descontínuo ou ocorre como <i>corestones</i> .	W4
Completamente intemperizado	Toda a rocha está decomposta e ou desintegrada à condição de solo. A estrutura original do maciço está, em grande parte, preservada.	W5
Solo residual	Toda a rocha está convertida em solo. A estrutura do maciço e a Fábrica da matriz da rocha estão destruídos. Há grande variação de volume, mas o solo não foi significativamente transportado.	W6

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Dados de deslocamento - A-DInSAR

Os resultados foram agrupados em dois períodos: (1) junho de 2018 a agosto de 2019 e (2) junho de 2019 a novembro de 2020, totalizando dois anos de monitoramento dos taludes da cava da mina de Brucutu.

Os mapas de velocidade de deslocamento LOS (ao longo da linha de visada) estão codificados em cores. Os pontos na cor branca indicam áreas estáveis (valores nulos). Os pontos nas cores avermelhadas indicam subsidência (valores negativos) e os pontos na cor azul indicam soerguimento (valores positivos).

6.1.1 Período de junho 2018 a agosto 2019

Conforme Tabela 2, no período de junho 2018 a agosto 2019, o valor mínimo de deslocamento, afastamento em relação ao SAR, foi de -76,3 mm/ano e o valor máximo de deslocamento, aproximação ao SAR, foi de 79,1 mm/ano.

Tabela 2. Estatística dos dados de taxa de deslocamento da área de estudo para o período de junho 2018 a agosto 2019.

Taxa de deslocamento (mm/ano)	
Média	0,343209023
Erro padrão	0,033643178
Mediana	0,6
Desvio padrão	10,15684147
Variância da amostra	103,1614287
Curtose	3,208775626
Assimetria	-0,120567465
Intervalo	155,4
Mínimo	-76,3
Máximo	79,1
Contagem	91143

Para esse período (junho 2018 a agosto 2019) foram identificados 91.143 PS em uma área de 2,957 km². Esse valor corresponde a aproximadamente 30.822,79 PS/km².

As maiores taxas de deslocamento (mm/ano) estão entre as cotas 1030 a 1000 (Figura 38). A Figura 39 exhibe os gráficos de deslocamento por unidade de tempo de um ponto de monitoramento na área afetada por instabilidade. Essa área anômala foi definida por fotointerpretação das trincas identificadas via imagem de VANT.

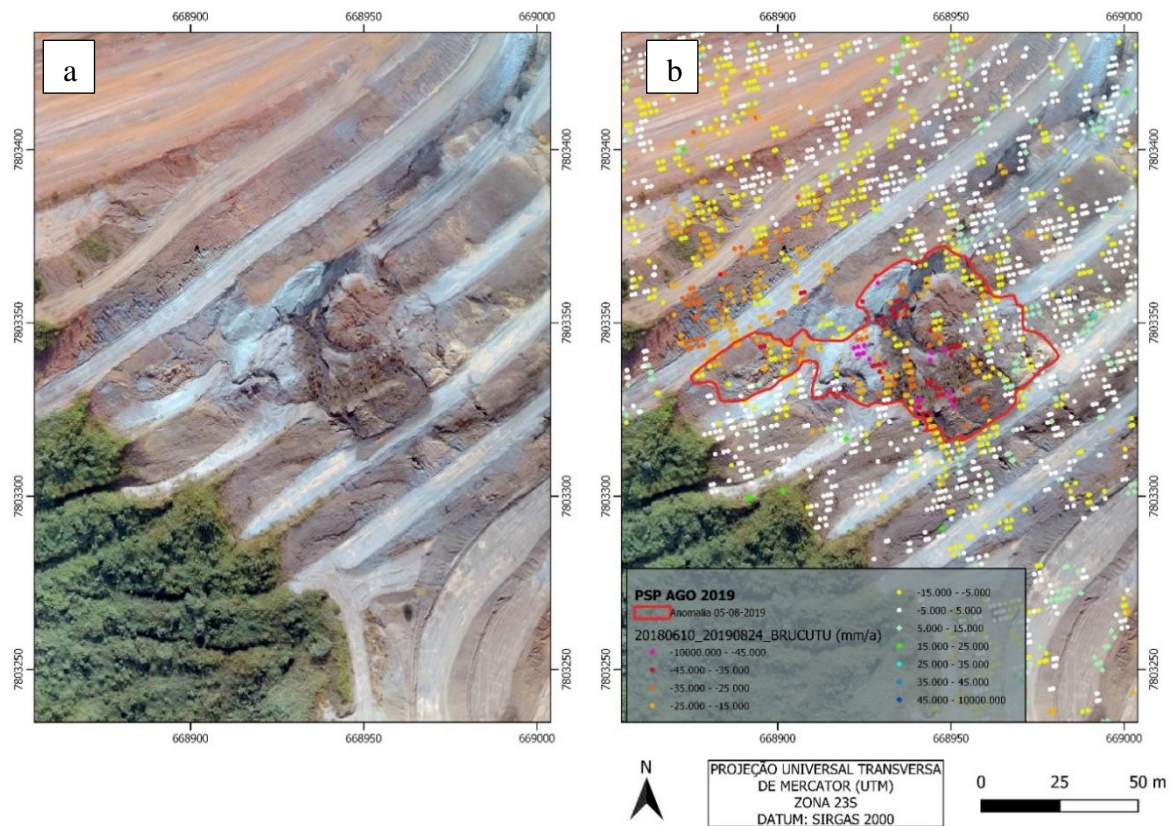


Figura 38. Ortoimagem da área de estudo (taludes entre as cotas 1030 a 1000 do setor GW) em 05 de agosto de 2019 (a) e disposição dos PS com destaque para área anômala (b).

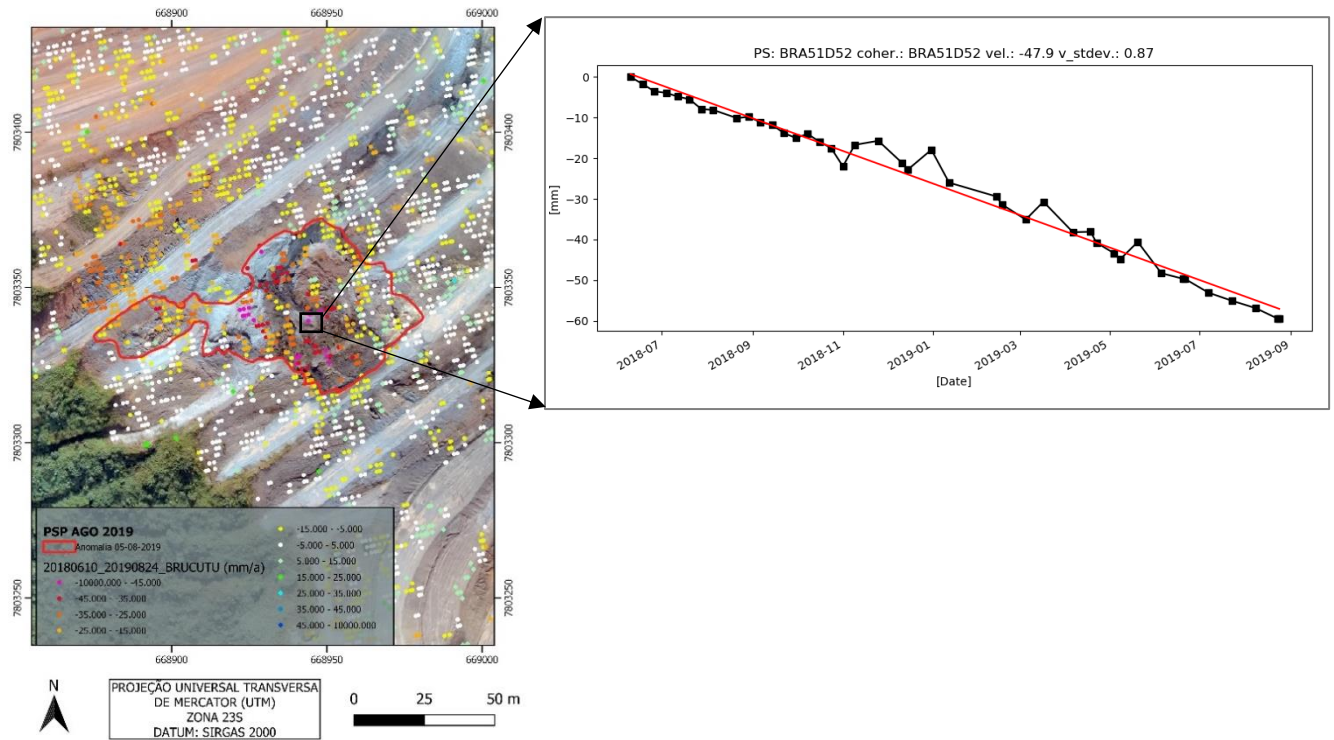


Figura 39. Gráfico de deslocamento (mm) x tempo para os PS na área de estudo.

Nesse caso, os valores negativos de deslocamento obtidos na região do talude do GW são indicativos de afastamento em relação ao SAR (subsidiência).

6.1.2 Período de junho de 2019 a novembro de 2020

Conforme Tabela 3, no período de junho de 2019 a novembro de 2020 o valor mínimo de deslocamento, afastamento em relação ao SAR, foi de -65,7 mm/ano e o valor máximo de deslocamento, aproximação ao SAR, foi de 41,6 mm/ano.

Tabela 3. Estatística dos dados de taxa de deslocamento da área de estudo para o período de junho de 2019 a novembro de 2020.

Taxa de deslocamento (mm/ano)	
Média	-0,787316085
Erro padrão	0,045439907
Mediana	-0,2
Desvio padrão	8,624250182
Variância da amostra	74,3776912
Curtose	2,441299782
Assimetria	-0,559328707
Intervalo	107,3
Mínimo	-65,7
Máximo	41,6
Contagem	36022

Foram identificados 36.022 PS em uma área de 2,957 km². Esse valor corresponde a aproximadamente 12.181,94 PS/km² (Figura 40). Nesse período os pontos de monitoramento (PS) foram perdidos na região do GW (cota 1030 a 1000) em decorrência da decorrelação temporal das imagens SAR. A área anômala foi definida a partir da identificação visual das trincas com base em imagens de VANT.

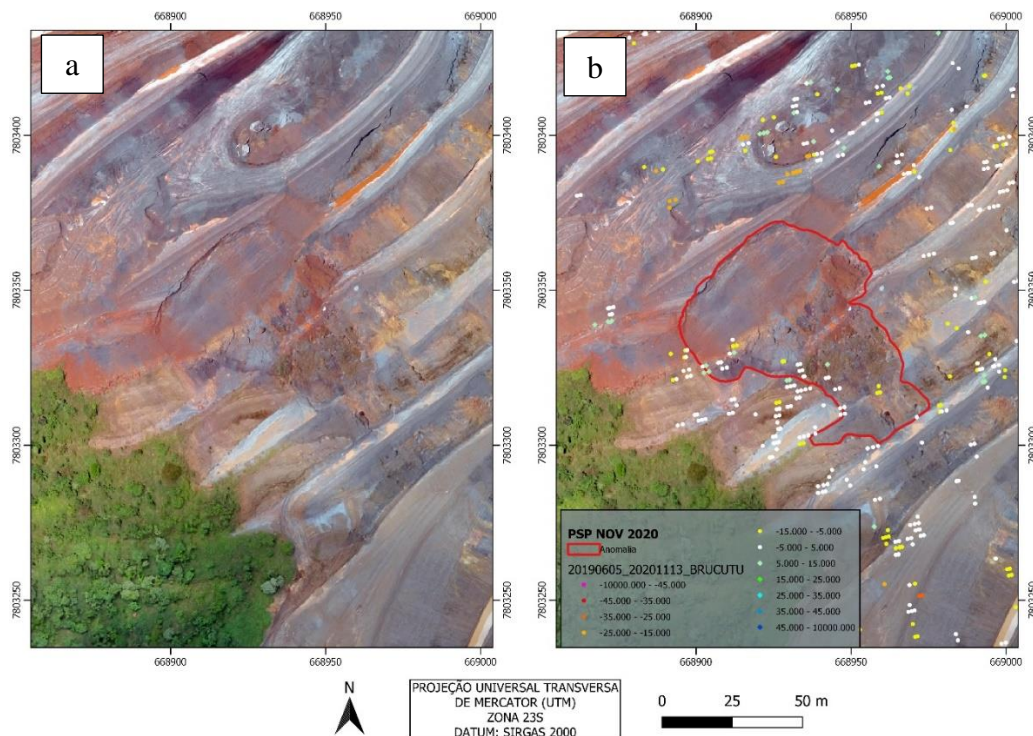


Figura 40. Ortoimagem da área de estudo (taludes entre as cotas 1030 a 1000 do setor GW) em novembro de 2020 (a) e disposição dos PS com destaque para área anômala (b).

6.2 Dados pluviométricos

Foram analisados dados de pluviometria para os períodos de: (1) junho de 2018 a agosto de 2019 e (2) junho de 2019 a novembro de 2020.

A Figura 41 mostra os dados mensais de pluviometria da Estação Meteorológica da Mina de Brucutu (BRUPL001) de junho de 2018 a agosto de 2019. Os dados pluviométricos indicam que nesse período o total de chuva acumulada foi de 1364,4 mm. No período de junho de 2018 o período de seca se estendeu até final de setembro, sendo os meses de junho e julho praticamente secos, com precipitação acumulada de 2,5 mm. Em 2019 o período seco se iniciou em junho e se estendeu até agosto com precipitação acumulada de 9,8 mm. Os meses mais chuvosos se estenderam do início de outubro de 2018 até fim de maio de 2019, acumulando um total de 1281,7 mm.

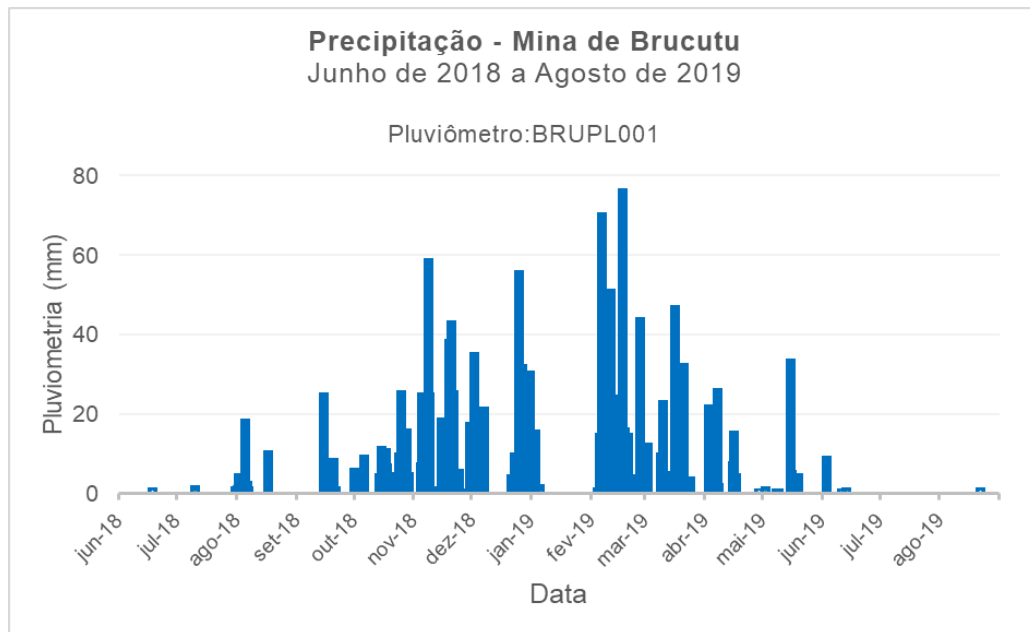


Figura 41. Pluviometria da estação BRUPL001 da mina de Brucutu referente ao período de junho de 2018 a agosto de 2019.

A Figura 42 mostra os dados mensais de pluviometria da Estação Meteorológica da Mina de Brucutu (BRUPL001) para o período de junho de 2019 a novembro de 2020. Os dados pluviométricos indicam que nesse período o total de chuva acumulada foi de 2154,6 mm.

O período de seca inicia em junho de 2019 e finda ao início de outubro de 2019, sendo os meses de agosto e setembro praticamente secos, com precipitação acumulada em torno de 73,9 mm.

Em 2020 o período seco se estendeu de junho a outubro, porém com precipitação acumulada um pouco maior que no ano anterior, com 240 mm acumulado. Por outro lado, os meses mais chuvosos se iniciaram em novembro/2019 e finalizaram em junho/2020, totalizando um acumulado de 1724,7 mm.

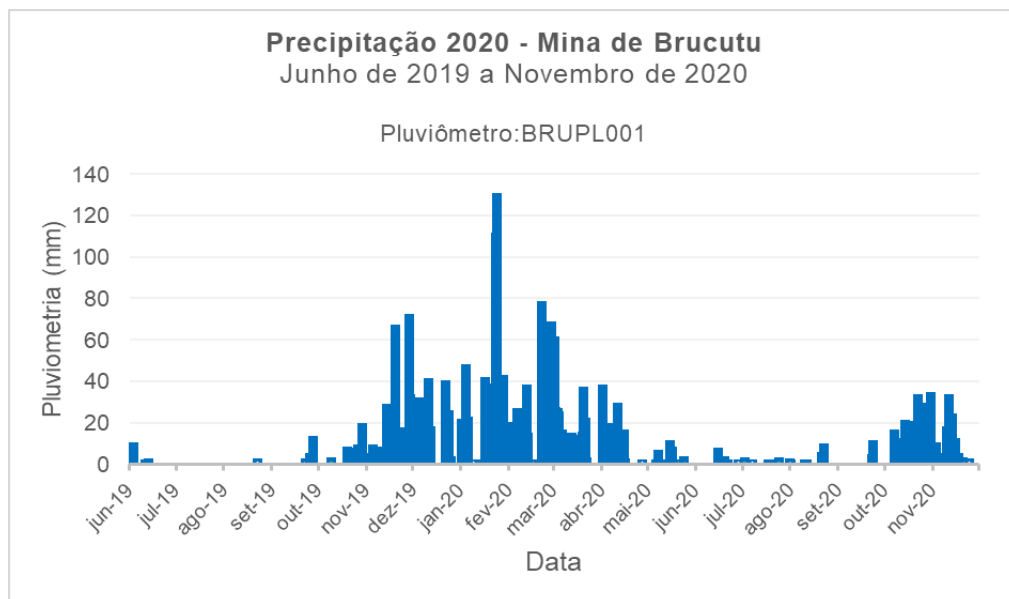


Figura 42. Pluviometria da estação BRUPL001 da mina de Brucutu referente ao período de junho de 2019 a novembro de 2020.

6.3 Sobrevoos de VANT e inspeção geotécnica de campo

A Figura 43 retrata o mapa de anomalias geotécnicas da mina de Brucutu, destacando as anomalias de campo de setembro/2020, surgências de água de julho/2020 e zonas de atenção para regiões com maior risco geotécnico associado.

Na área foco desse estudo (GW), existem erosões e perda da integridade física de face de talude, instabilidade de bancadas e porções mais saturadas de água entre as cotas 1000m e 1030m.

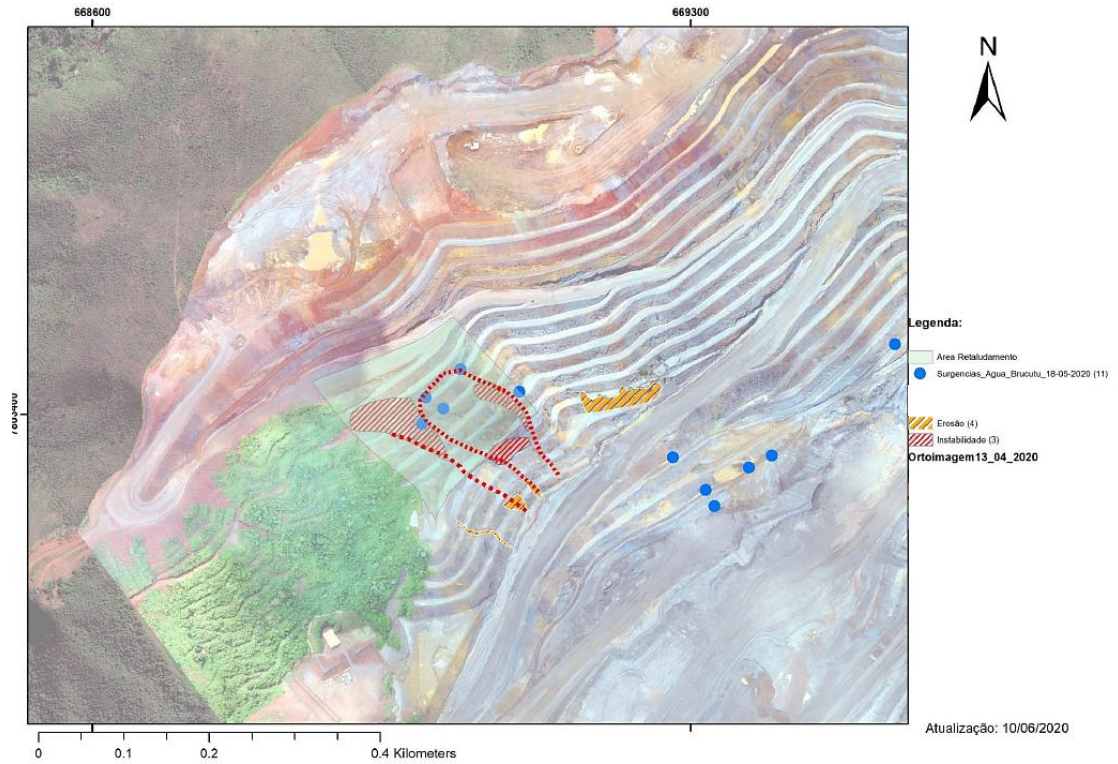


Figura 43. Mapa de Anomalias Geotécnicas da região do GW da mina de Brucutu.

No período entre abril/2020 e junho/2020, foram realizadas obras de retaludamento na região do GW para conformação da face dos taludes e implantação de dispositivos de drenagem. Porém, com o retorno do período chuvoso entre setembro e outubro de 2020, ocorreram novas erosões e perda da integridade física de face, instabilidade de bancadas e áreas com surgências de água (Figura 44).



Figura 44. Condições dos taludes em setembro/2020, com destaque para a ruptura plano-circular e trincas no topo da berma.

A evolução das condições estruturais dos taludes da região GW para o período de agosto/2019 a abril/2020 pode ser observada na Figura 45. Nesse período ocorreu o aumento do processo erosivo com surgimento de trincas e perda da integridade física da face dos taludes. Em meados de junho/2020, foi realizada a reconformação dos taludes, nesse período surgiram trincas e acomodação do material do talude. Com o retorno do período chuvoso no final de setembro avançando até novembro/2020, ocorreram novas erosões com a evolução das trincas preexistentes.

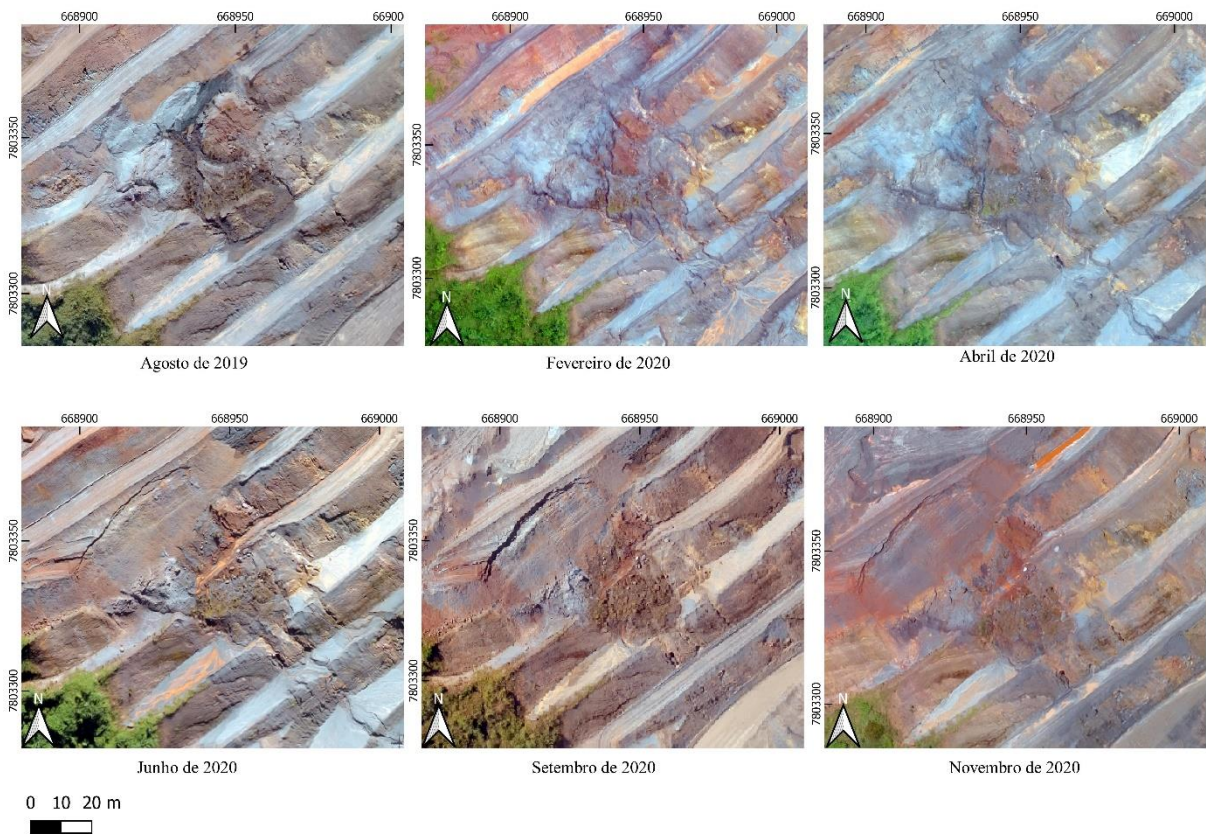


Figura 45. Imagens de drone mostrando a evolução dos taludes de agosto de 2019 a novembro de 2020 na região GW da mina de Brucutu.

6.4 Dados geológicos e geomecânicos

Foram identificados 9 materiais na cava da mina de Brucutu. São eles, itabiritos friáveis (IF) e compactos (IC), hematitas friáveis (HF) e compactas (HC), itabiritos e hematitas goethíticas (IGO e HGO), itabiritos e hematitas anfibolíticas (IA e HA), e, por fim, itabiritos manganésíferos (IMN). Na área de estudo, predominam 3 litotipos: o itabirito friável (IF), as rochas pós-colisionais intrusivas (IN) e a brecha friável (BF) (Figura 46).

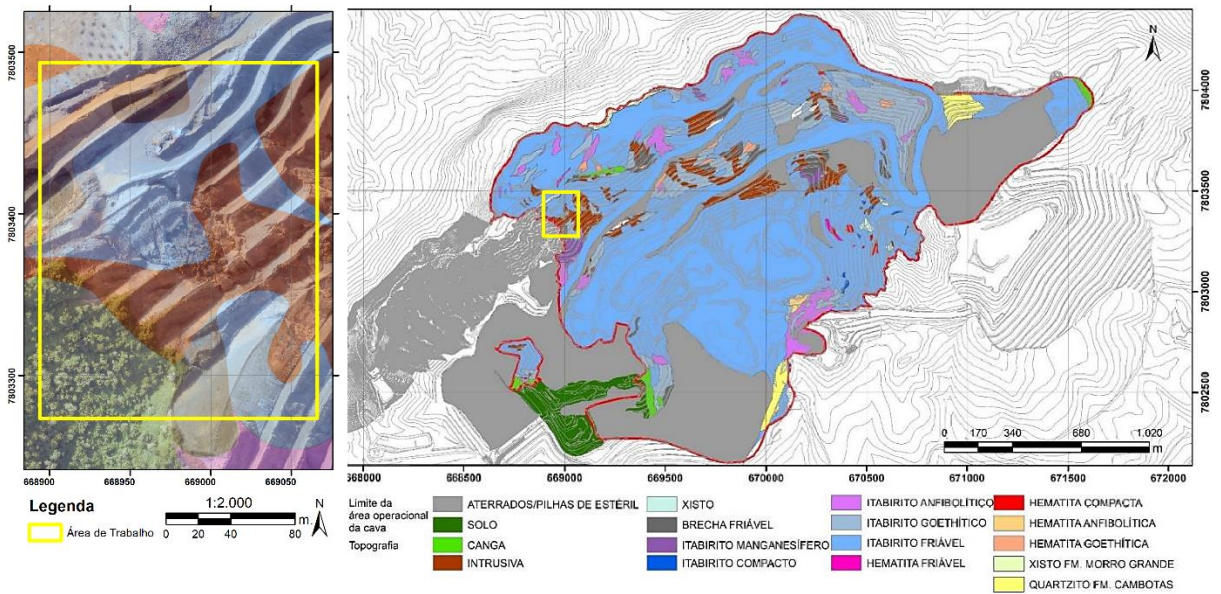


Figura 46. Mapa geológico da mina de Brucutu, com destaque para área de estudo.

Com relação aos litotipos da área de estudo, o itabirito friável engloba as demais litologias, sendo perceptíveis intercalações e lentes de outros tipos de itabirito e hematitas em contato gradual com essa litologia. As demais litologias, xistos, quartzitos e intrusivas mapeadas apresentam contato abrupto com o itabirito friável, subparalelizado ao bandamento composicional da rocha, exceto nos casos em que a intrusiva metabásica ocorre em geometria de dique.

O Itabirito friável (Figura 47) apresenta grande distribuição geográfica na área de estudo, geologicamente possui coloração cinza a prata em face fresca e quando fortemente intemperizada, observa-se uma capa de coloração bege. A rocha é constituída tipicamente por uma intercalação rítmica de bandas quartzosas de granulação fina a média e espessuras milimétricas a centimétricas e bandas cinzas ricas em óxidos de ferro, hematita granular ou especularita de granulação fina a média.

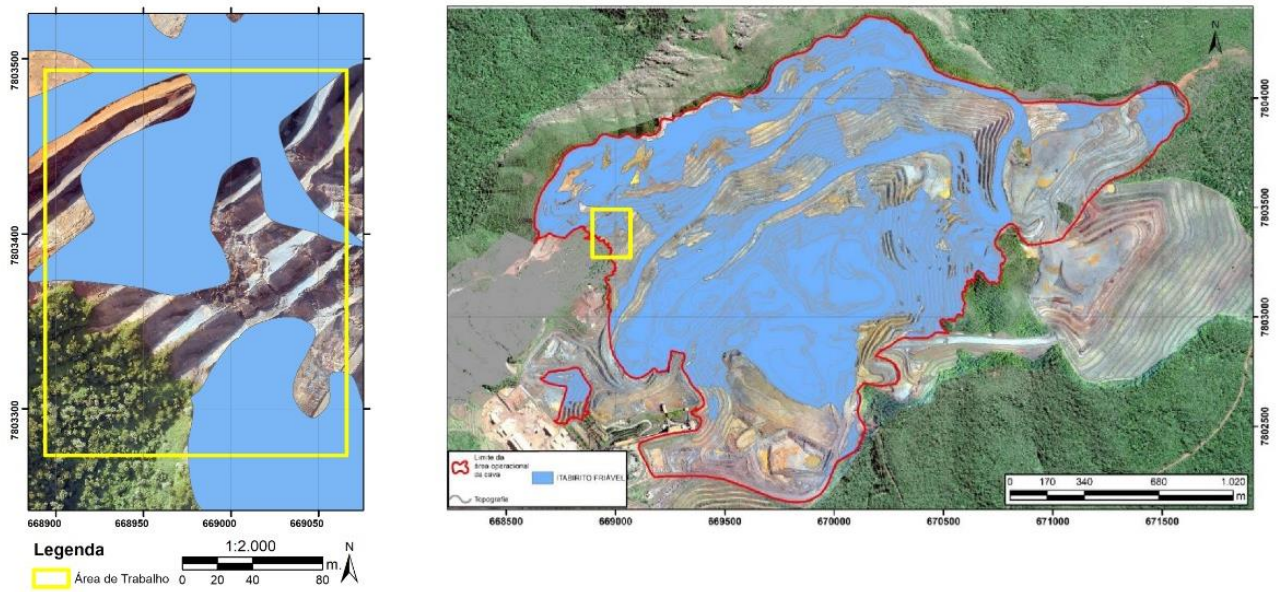


Figura 47. Disposição superficial do Itabirito friável (IF) na cava Brucutu, com destaque para a área de estudo em amarelo.

A trama da rocha é composta pelo bandamento composicional, estruturado pelos cristais de quartzo e hematita recristalizados e orientados sobre a direção desse plano. Frequentemente observa-se o bandamento paralelizado e transposto à foliação nesse litotipo.

De modo geral encontra-se muito alterado, com resistências variando de R0 a R2-, sendo predominante a resistência R0 e o grau de intemperismo W5. A Figura 48 ilustra o Itabirito Friável próximo da região de estudo (cota 1030).



Figura 48. Itabirito friável com resistência muito branda inferior (R1-) (a) e grau de alteração de rocha completamente alterada (W5) (b).

Na região do GW foram mapeados corpos ígneos de rocha metabásicas em contato com formação ferrífera. Esses corpos metabásicos encontram-se concentrados principalmente na anomalia erosiva. Trata-se de metagabros e metadiabásios. Tais corpos apresentam direção geral entre NW-SE e NE-SW (Figura 49).

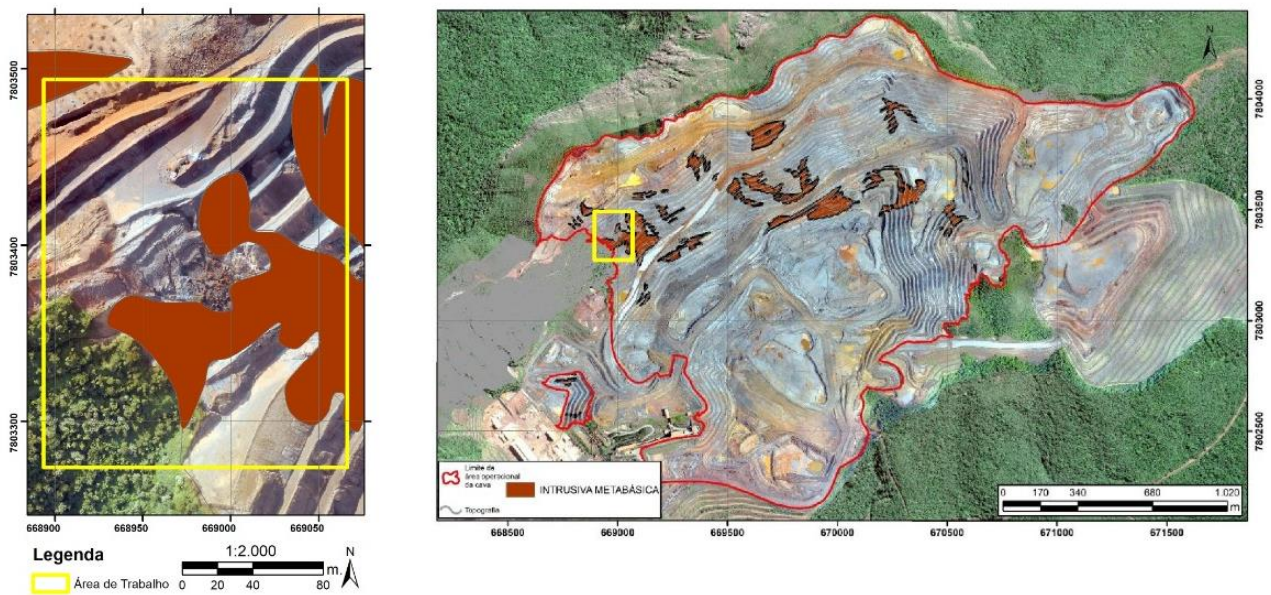


Figura 49. Disposição superficial das rochas metabásicas na cava Brucutu, com destaque para a área de estudo.

As rochas intrusivas (IN) são majoritariamente de coloração bege a alaranjada, por vezes ocre e com tons rosáceos, com aspecto sedoso ao tato e intensamente intemperizadas, o que dificulta a identificação mineralógica, mesmo com o auxílio de lupa. Apresentam textura ígnea completamente obliterada, sendo predominantemente micácea e subordinadamente granular, de granulação média a grossa, com sericita e caulim como mineralogia de intemperismo prontamente observável e manchas de óxidos de coloração ocre associadas. Por fim, magnetita e demais minerais opacos podem ocorrer disseminados pontualmente (Figura 50).



Figura 50. Sill de intrusiva metabásica, de coloração bege, “dobrado” (região do EX) (a) e Amostra de mão de rocha metabásica alterada (b).

Além disso, na área de estudo foi analisado outro tipo textural que ocorre de forma restrita na região norte do GW, a partir da cota 1010 m. São rochas de coloração cinza-azulada clara a lilás, intensamente intemperizadas, proeminentemente xistosas. Nas ocorrências observa-se textura predominantemente micácea e subordinadamente granular, de granulação média a grossa e textura ígnea muito pouco preservada. Minerais micáceos e argilominerais de coloração lilás a incolor e caulim são predominantes, e de forma subordinada, minerais máficos prismáticos, provavelmente anfibólio/piroxênio e plagioclásio incolor (Figura 51).



Figura 51. Rocha com coloração cinza-azulada clara a lilás, intensamente intemperizada, proeminentemente xistosa (banco 1040 da região EX) (a) e Amostra de mão (b).

A trama da rocha é frequentemente foliada, por vezes de forma incipiente, por vezes de forma pervasiva. Em algumas exposições, observam-se sericita e argilominerais orientados e estirados segundo o plano da foliação, compondo uma lineação de estiramento mineral, e menos frequente, minerais prismáticos orientados formando uma lineação mineral.

O contato das rochas metabásicas com suas encaixantes, principalmente a formação ferrífera, se dá de forma predominantemente concordante aos planos da descontinuidade principal observada nos taludes, conformando *sills* de espessuras métricas a decamétricas e, restritamente sob a forma de diques, cuja espessura em face de talude ocorre de porte decimétricos a decamétricos (Figura 52).

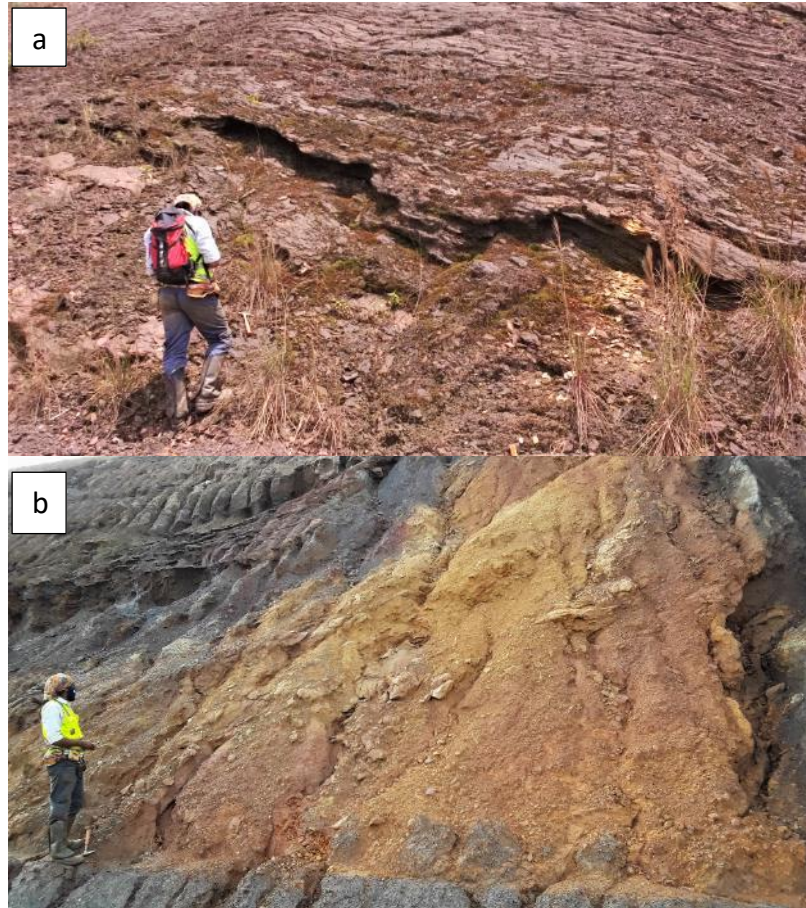


Figura 52. *Sill* decamétrico de IN foliada (banco 1010 da região GW) (a) e Dique métrico foliado de IN (banco 1030 da região EX) (b).

As rochas metabásicas intrusivas são exclusivamente friáveis em superfície na região do GW. Apresentam resistências variando de extremamente branda (R0) a branda (R2-), com maior ocorrência de resistências brandas inferiores (R1-) e grau de intemperismo variando de W6 a W4, sendo o grau W5 o de maior ocorrência.

O litotipo Brecha friável (BF) foi mapeado como lentes que podem atingir desde porte métrico até centenas de metros. Os afloramentos encontram-se de forma pontual na região GW (Figura 53).

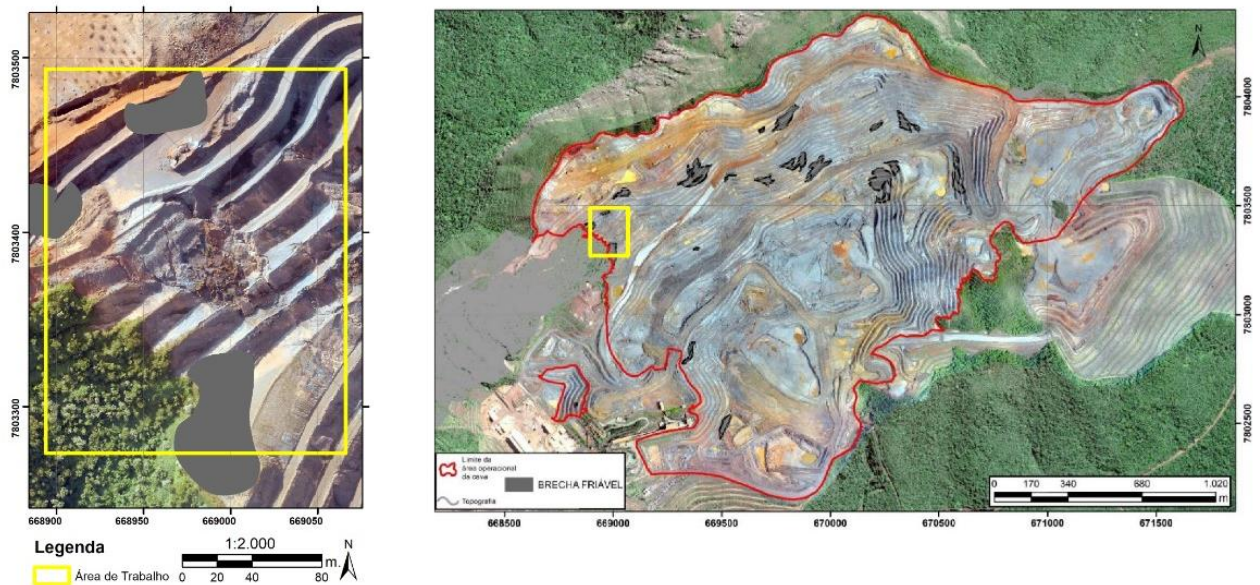


Figura 53. Disposição superficial da brecha friável (BF) na cava Brucutu, com destaque para a área de estudo.

Os contatos da brecha friável estão diretamente associados à rocha intrusiva metabásica, aos itabiritos goethíticos e manganésíferos. De forma geral, ocorre como um litotipo transicional entre a IN e as variações de itabiritos supracitadas.

A rocha apresenta coloração cinza escuro com tons avermelhados e amarronzados e ocorre de forma intensamente alterada (Figura 54). Apresenta composição predominantemente argilosa, com mineralogia de granulação fina a média composta por caulim, argilominerais, sericita e quartzo. Subordinadamente observa-se variações predominantemente quartzosas e arenosas de granulação grossa.

A trama da rocha é composta essencialmente pela foliação milonítica penetrativa, onde se observam agregados de quartzo recristalizados, de granulação média a grossa e sigmoidais em meio à matriz argilosa.

As brechas friáveis apresentam resistências variando de extremamente branda (R0) a brandas inferiores (R1-) e grau de intemperismo variando de W6 a W5.

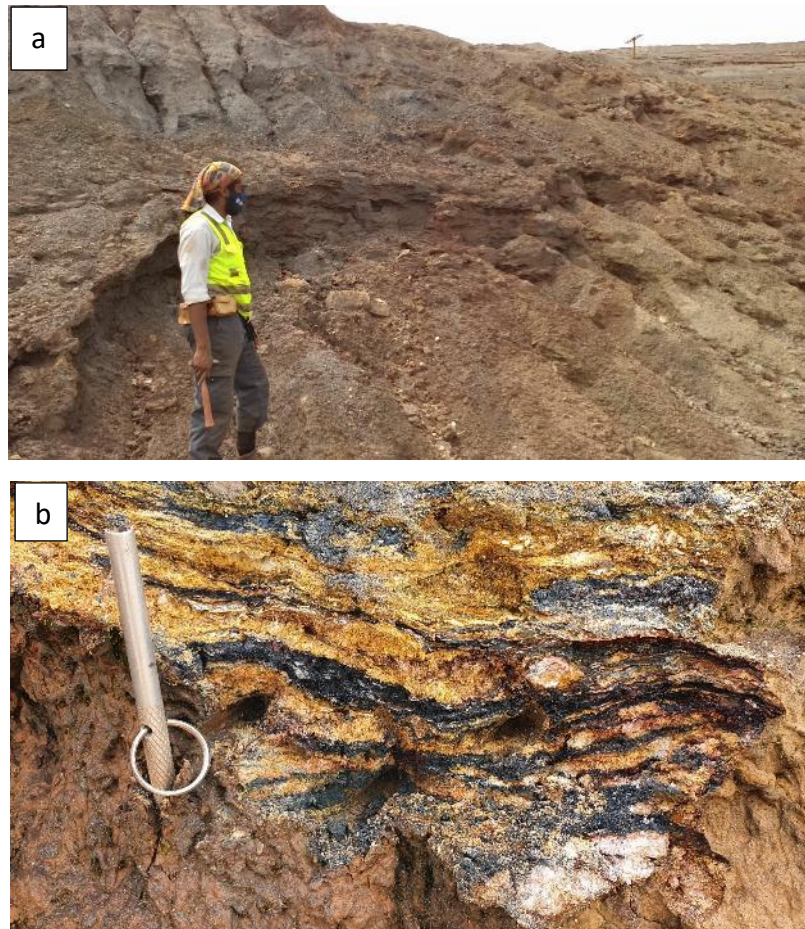


Figura 54. Talude composto por brecha friável (BF), de resistência R1- e grau de alteração W5 (banco 1050 da região GN) (a) e detalhe para a foliação milonítica da rocha (b).

6.5 Dados estruturais

A cava foi dividida em cinco Domínios Estruturais (Figura 55), porém, será dado ênfase ao domínio I, tendo em vista que é onde está situada a área deste estudo.

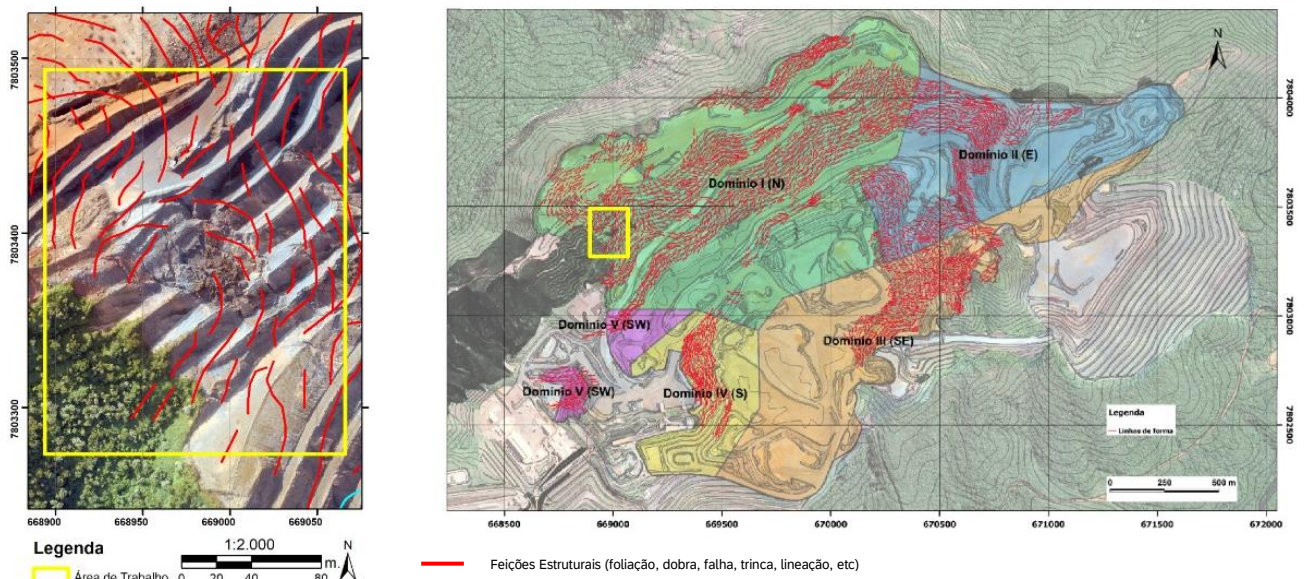


Figura 55. Domínios estruturais para cava Brucutu, com destaque para a área de estudo.

A região do GW está situada na região do Domínio I (N) localizada na porção norte da cava, limitado a norte pela crista da serra do Tamanduá que contorna a cava Brucutu e a sul pelo fundo da cava. A orientação média da foliação (Sn) é 137/32 (Figura 56). As atitudes das fraturas estão pulverizadas, havendo maior concentração com atitude média de 334/85 (Figura 57).

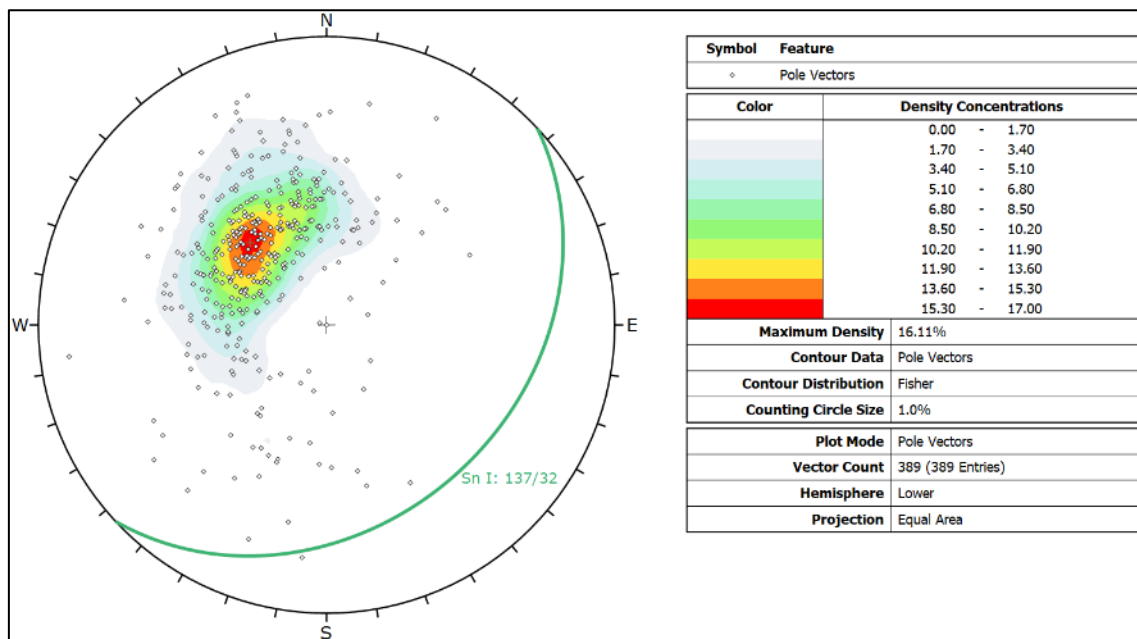


Figura 56. Diagrama Estereográfico (Fisher) – Foliação pertencente ao domínio I.

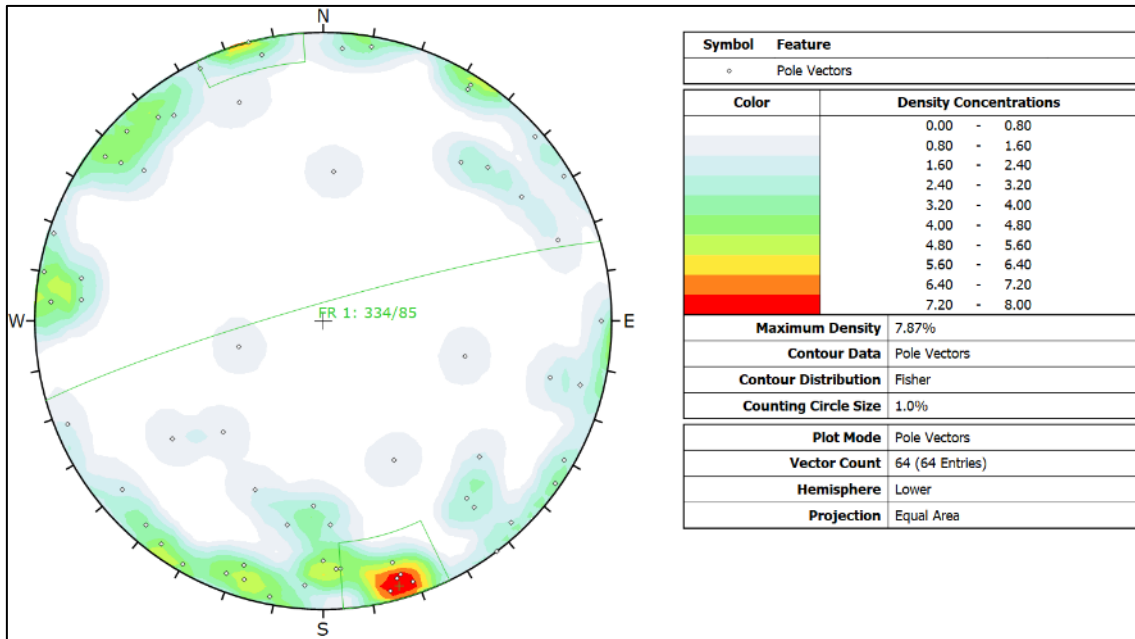


Figura 57. Diagrama Estereográfico (Fisher) – Família de fraturas pertencente ao domínio I.

6.6 Dados de deslocamento - Radar terrestre

Os perfis de deslocamento do radar de campo IBIS (ao longo da linha de visada) estão codificados em cores. As cores indicam os movimentos para fora ou para dentro do maciço rochoso. Os pontos na cor verde indicam áreas estáveis (valores nulos). Os pontos nas cores avermelhadas indicam movimentos para dentro do maciço (valores positivos). E os pontos na cor azul indicam movimentos para fora do maciço (valores negativos).

Ao longo do período de monitoramento é possível observar a presença da anomalia na região do GW e um padrão de deslocamento positivo acumulado de aproximadamente 50 mm (Figura 58).

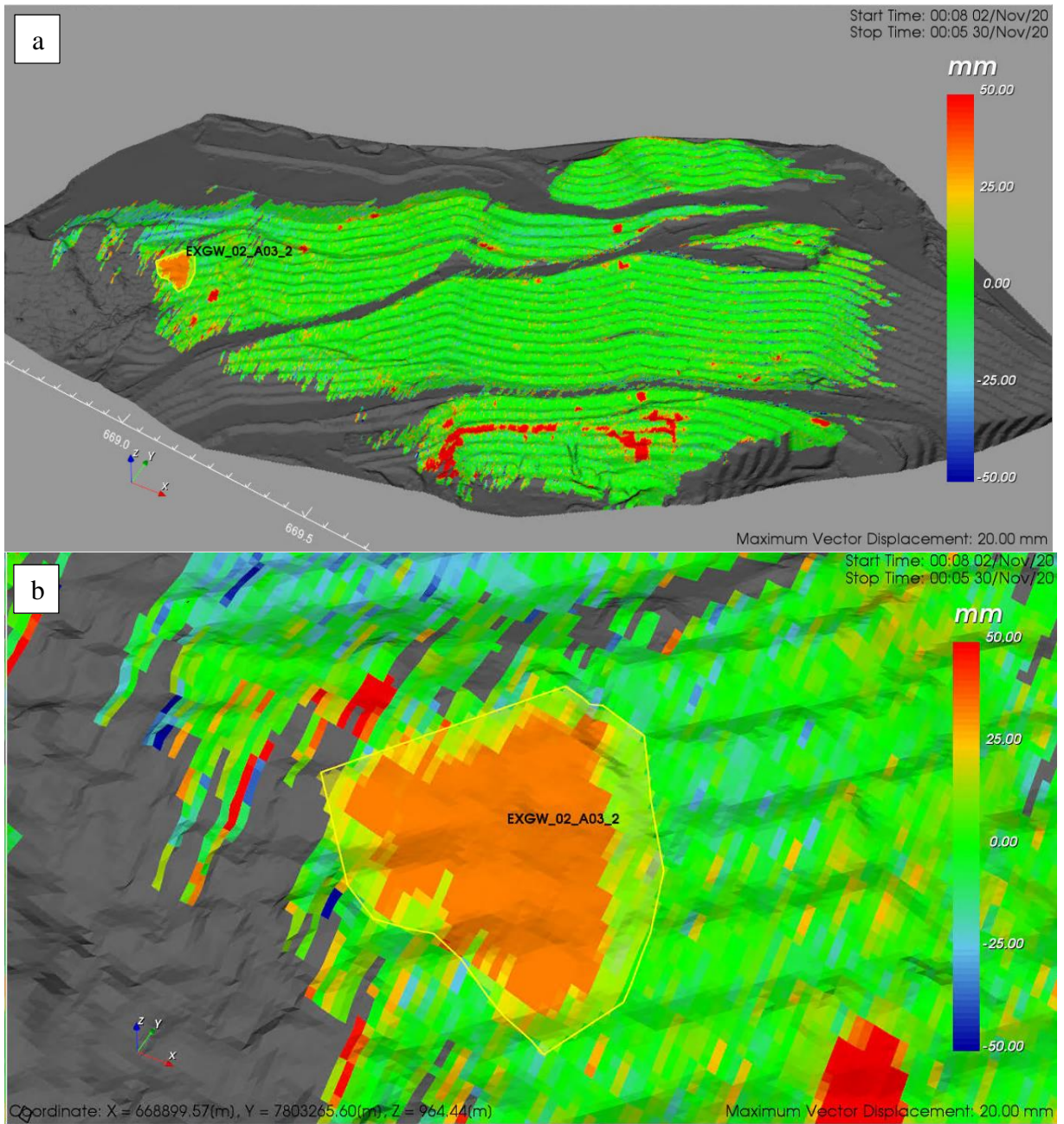


Figura 58. Mapa de deslocamento do flanco norte da mina de Brucutu obtido a partir do radar terrestre (a), com destaque para a anomalia geotécnica do setor GW (b).

A Figura 59 mostra um gráfico do deslocamento (mm) ao longo tempo da anomalia EXGW_02_A03_2. O deslocamento variou no dia 10/11/2020 de aproximadamente 20 mm até 50 mm no dia 18/11/2020. Os resultados do InSAR para o mês de novembro de 2020 mostraram através dos dados estatísticos que o valor mínimo de deslocamento, indicando o afastamento em relação ao SAR, foi de -67,9 mm/ano e o valor máximo de deslocamento, indicando

aproximação ao SAR, foi de 45,3 mm/ano. Porém, apesar dos dois instrumentos conseguirem registrar a ruptura plano-circular para a região do GW, não é possível comparar de forma direta os dois métodos, pois a geometria de visada, as escalas temporais e a taxa de deslocamento são totalmente distintas.

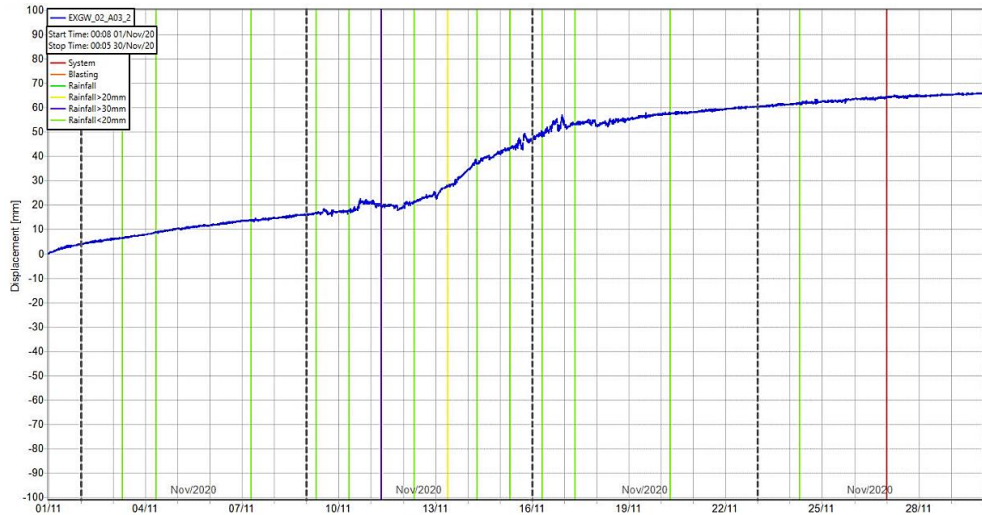


Figura 59. Gráfico de deslocamento da anomalia EXGW_02_0A3_2 ao longo do tempo.

Pode-se ainda verificar que houve um aumento de velocidade para o período de 10/11/2020 a 20/11/2020 em que a velocidade variou de -35 a 40mm/dia, por conta do aumento da taxa pluviométrica chegando a valores acima de 30mm no dia 11/11/2020. Após esse período houve a estabilização dos valores de deslocamento, mostrando uma tendência de acomodação do material (Figura 60).

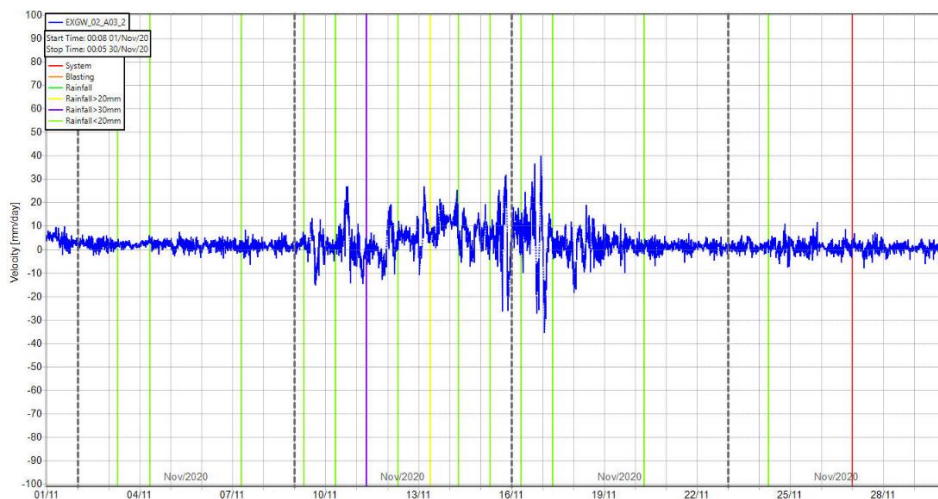


Figura 60. Gráfico de velocidade da anomalia EXGW_02_0A3_2 ao longo do tempo.

6.7 Correlação dos resultados e hipóteses sobre as instabilidades

As Figuras 61 e 62 retratam que as principais causas para as instabilidades no setor GW da mina de Brucutu estão relacionadas com componentes geológicos, geotécnicos, estruturais, hidrogeológicos e pluviométricos.

As instabilidades presentes nos bancos 1000 a 1030 da região GW estão relacionadas a rochas intrusivas (IN) em contato abrupto com itabirito friável (IF) da Formação Cauê. Sá et al. (2013) verificou na cava da mina N4E em Carajás, que as rupturas estavam associadas ao contato de corpos de hematita com rochas máficas.

A foliação principal possui orientação paralela aos taludes e mergulho inferior ao mergulho dos taludes. Esta condição é desfavorável a estabilidade dos taludes do GW, levando a rupturas do tipo plano-circular.

As Figuras 34 e 35 mostram o modelo hidrogeológico da mina de Brucutu. Observa-se que o aquífero livre se encontra em profundidade. A Figura 61 mostra pontos de surgência da água no setor do GW, provenientes de aquíferos suspensos, em especial pelo fato da direção do fluxo da água subterrânea estar no sentido de oeste (W) para leste (E), contribuindo para a geração de instabilizações nos taludes.

Os dados pluviométricos mostram que a incidência de chuva foi responsável pela erosão do itabirito friável, afetando a geometria dos taludes, conforme evidenciado na Figura 61.

A Figura 33 mostra que ocorrem na área de estudo maciços rochosos altamente intemperizados e friáveis de baixa qualidade geomecânica. O contato de rochas intrusivas (pós-orogênico) com Itabirito Friável (IF) (Grupo Itabira – Formação Cauê) propicia o desmantelamento das faces do talude. Esse rompimento é condicionado pelo fato de o itabirito friável estar situado sobre a rocha intrusiva na área de estudo, como o itabirito é mais denso que a intrusiva, a instabilização do talude é favorecida.

As taxas de deformação superficiais detectadas nos períodos analisados são classificadas como muito lentas para o InSAR e lentas para o radar de campo, segundo o método de descrição de escorregamentos da IUGS (1995). Além disso, analisando a quantidade de PS, nota-se que o período de junho 2018 a agosto 2019 registra uma maior concentração de PS (91.143) quando comparado ao período de junho de 2019 a novembro de 2020 (36.022). Essa diferença na quantidade de PS (perda dos pontos de monitoramento) está relacionada a dois

fatores principais: aumento da taxa pluviométrica no período de junho de 2019 a novembro de 2020 e movimentação de materiais em decorrência da atividade de lavra na cava da mina de Brucutu, levando a desconexão temporal das imagens de radar.

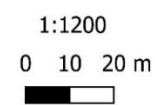
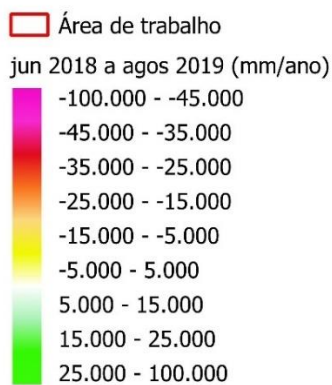
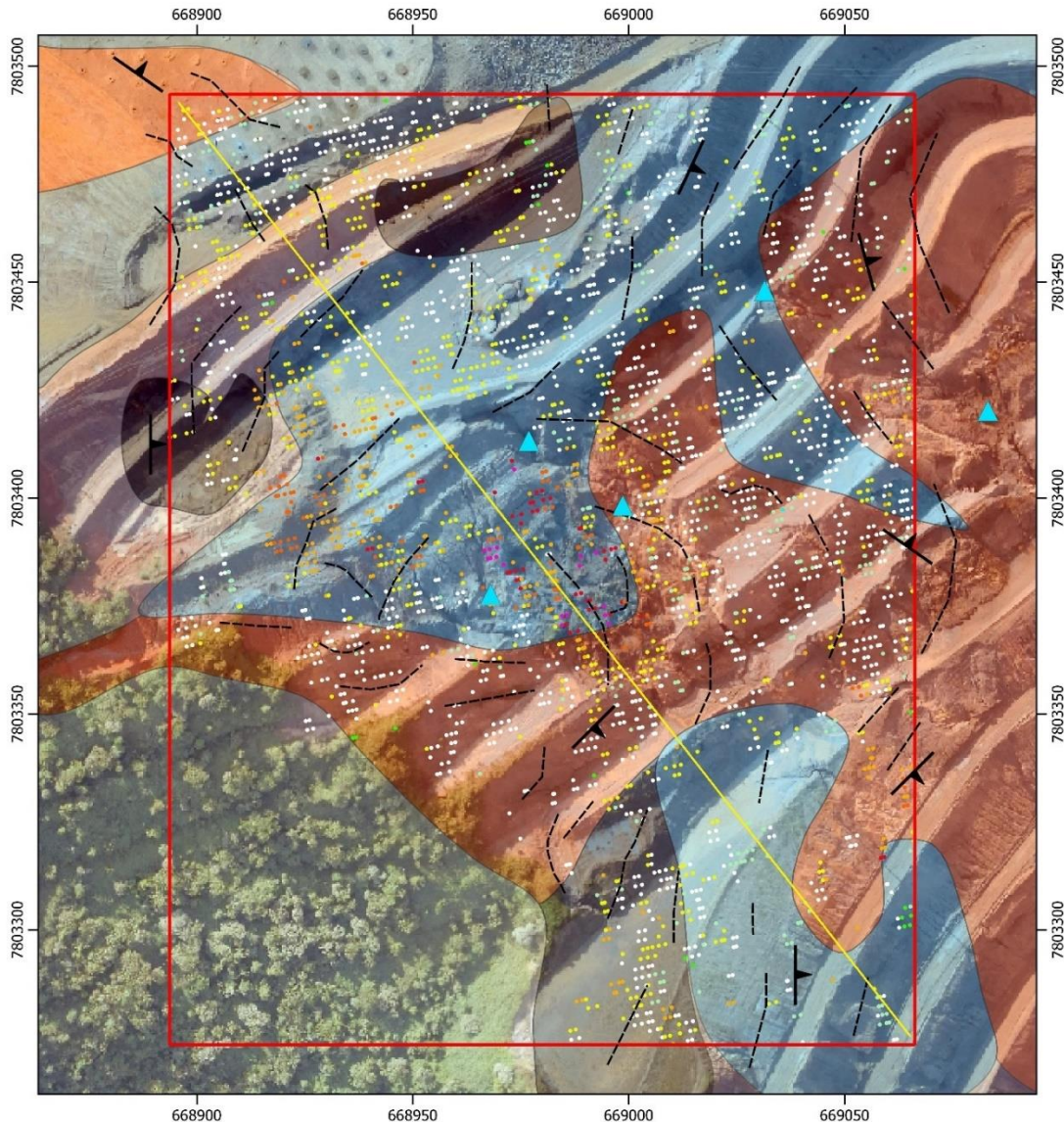


Figura 61. Integração dos dados litológicos, estruturais, de surgências e do radar orbital na área de estudo.

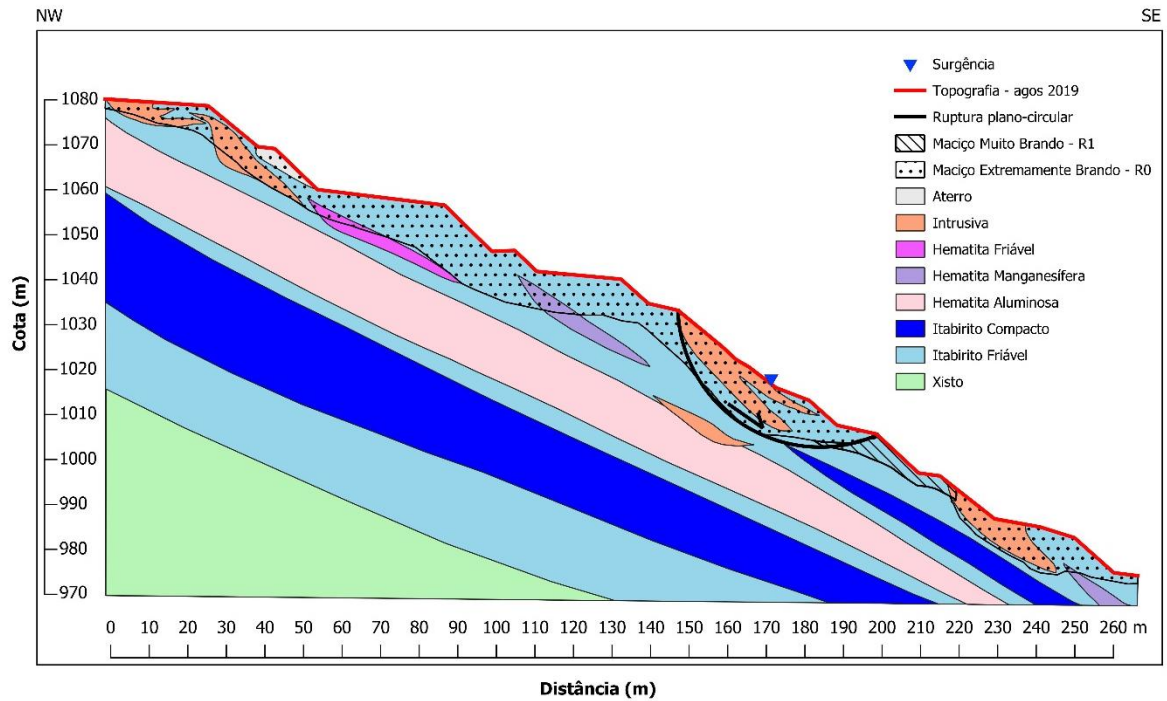


Figura 62. Seção geológica NW-SE, conforme indicado na figura anterior.

7. CONCLUSÕES

- As instabilidades do setor GW para os taludes entre as cotas 1000 e 1030 estão condicionadas pelo contato da formação ferrífera friável com rochas intrusivas altamente intemperizadas. Além disso, a presença de surgências de água na face dos taludes, o fluxo da água subterrânea estar no sentido de oeste (W) para leste (E) e o aumento da taxa pluviométrica no período de junho de 2019 a novembro de 2020 comparado com o período de junho de 2018 a agosto de 2019, contribuem com o aumento da umidade nos materiais geológicos. A direção preferencial das estruturas com mergulho para sudeste, no mesmo sentido da direção de mergulho dos taludes também induzem instabilidades. Dessa forma, os dados compilados mostram que erosões e escorregamentos atuaram conjuntamente para a instabilização dos taludes, pois as rochas são muito friáveis na região de estudo.
- Os resultados obtidos através da metodologia PSI foram eficazes para o período seco, com maior grau de recuperação de pontos PS. Já para o período chuvoso, foram inferiores, pois as altas taxas pluviométricas no período de junho de 2020 a novembro de 2020 junto com a reconfiguração nos taludes do setor GW culminam na desconexão temporal e perda dos PS. Sendo essa uma fragilidade na aplicação da tecnologia A-DinSAR.
- Para trabalhos futuros recomenda-se a utilização das visadas descendente e ascendente de modo a permitir a extração dos componentes vertical e horizontal. Além de ser possível comparar de forma mais ampla os resultados obtidos em períodos chuvosos e períodos secos para fins de monitoramento geotécnico.

REFERÊNCIAS

ANM - AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. **Anuário Mineral Brasileiro: principais substâncias metálicas 2020**. 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro/amb_2020_ano_base_2019_revisada2_28_09.pdf> Acesso em: 12 mai. 2021.

ANGELI, G. **Mapeamento litoestrutural da mina de Brucutu escala 1:10.000**. Relatório interno Vale S.A., São Gonçalo do Rio Abaixo, v.1, p. 5-53. 2011.

ALKMIM, F. F. & MARSHAK, S. *The transamazonian orogeny in the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil: Paleoproterozoic collision and collapse in the Southern São Francisco craton region*. Prec. Res. 90, p.29-58. 1998.

ALKMIM, F. F. & MARTINS-NETO, M. A. Proterozoic first-order sedimentary sequences of the São Francisco craton, eastern Brazil. Mar. Pet. Geol. 33, 127-139. 2012.

ALKMIM, F. F. História Geológica de Minas Gerais. In: Pedrosa-Soares A.C., Voll E., Cunha E.C. (eds.) Recursos Minerais de Minas Gerais On Line: síntese do conhecimento sobre as riquezas minerais, história geológica, meio ambiente e mineração de Minas Gerais: Companhia de Desenvolvimento de Minas Gerais (CODEMGE), 1, Belo Horizonte, 2018. p. 1-35. Disponível em: <<http://recursomineralmg.codemge.com.br/historia-geologica-de-minas-gerais/>> Acessado em: 24 abril de 2021.

ALMEIDA, L. G.; OLIVEIRA, D. J.; ENDO, I. O arcabouço estratigráfico-estrutural da região de Dom Bosco/Bela Vista, Quadrilátero Ferrífero, como manifestação da orogênese minas com polaridade tectônica para sudoeste. 11 Simpósio de Geologia de Minas Gerais, Belo Horizonte, SBG/ Núcleo Minas Gerais, Belo Horizonte. Anais, arquivo eletrônico. 2001.

ALMEIDA, L. G.; ENDO, I.; FONSECA, M. A. Sistema de *nappes* na porção meridional do Quadrilátero Ferrífero, MG. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 41, João Pessoa, Anais, p.615. 2002.

ALMEIDA, L. G. **Evolução Tectônica da porção central do sinclinal Dom Bosco, Quadrilátero Ferrífero – Minas Gerais.** 2003. Dissertação de mestrado – Departamento de Geologia da Universidade Federal de Ouro Preto, 110p.

ALMEIDA, L. G. **Evolução tectônica da porção central do sinclinal Dom Bosco, Quadrilátero Ferrífero - Minas Gerais.** 2004. Departamento de Geologia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto. Dissertação de Mestrado, 110p.

ALMEIDA, L. G.; CASTRO, P. DE T. A.; ENDO, I.; FONSECA, M. A. O Grupo Sabará no sinclinal Dom Bosco, Quadrilátero Ferrífero: uma revisão estratigráfica. **Rev. Bras. de Geociências.** 35 (2):177-186. 2005.

ASI, (ITALIAN SPACE AGENCY). COSMO-SkyMed Mission and Products Description. Rome: Italian Space Agency, 2016. Disponível em: <http://www.asi.it/sites/default/files/attach/bandi/cosmoskymed_mission_and_products_description_update_2_1.pdf>. Acesso em 12 mar. 2021.

ASI, ASI, (ITALIAN SPACE AGENCY). COSMO-SkyMed Mission and Products Description. Rome: Italian Space Agency, 2019. Disponível em: < https://www.asi.it/wp-content/uploads/2019/08/COSMO-SkyMed-Mission-and-Products-Description_rev3-2.pdf> Acesso em 12 mar. 2021.

ANDRADE N. S. O.; ROSA A. N. C. S; FARIA P. C. C. Fundamentos de Polarimetria SAR. Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, Brasil, INPE, p. 4775-4782. 2007.

BARBOSA L. H. DO C., ARAÚJO L. P., ASSUNÇÃO P. H. DA S., BOVOLENTA R. G., CANABRAVA R. L. P., CARNEIRO M. B., CIARALLO F., COSTA T. L. DA S., FAVERSANI G., MASSA G. F., GONÇALVES W. F., GUEDES I. N. R., HORTA L. F. C., PEDROSA JR A. C., OLIVEIRA V. Q., SCHFFER P. N. M., ENDO I. 2017. Falha Itacolomi: uma nova estrutura do Quadrilátero Ferrífero. Departamento de Geologia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto. Anais do Geosudeste 15º Simpósio de Geologia do Sudeste e 19º Simpósio de Geologia de Minas Gerais, Diamantina – Minas Gerais.

BARBOSA L. H. DO C. **Serra do Itacolomi revisitada: estratigrafia, arcabouço estrutural e aplicação de métodos geofísicos, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais.** 2018. Monografia do Trabalho de Conclusão de Curso, Departamento de Geologia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. 133p.

BEATO, D.A.C; MONSORES, A.L.M.; BERTACHINI, A.C. **Hidrogeologia in: Projeto APA Sul RMBH Estudos do Meio Físico: Área de Proteção Ambiental da Região Metropolitana de Belo Horizonte.** SEMAD/CPRM, Volume 8. Belo Horizonte - MG. 2005.

BERARDINO, P., FORNARO, G., LANARI, R.E SANSOSTI, E. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(11), 2375 – 83. 2002.

BERARDINO, P.; COSTANTINI, M.; FRANCESCHETTI, G.; IODICE, A.; PIETRANERA, L.; RIZZO, V. Use of differential SAR interferometry in monitoring and modelling large slope instability at Maratea (Basilicata, Italy). *Engineering Geology*, v. 68, p. 31–51. 2003.

BURGMANN, R.; ROSEN, P.A.; FIELDING, E.J. Synthetic aperture radar interferometry to measure Earth's surface topography and its deformation. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* v. 28. p. 169-209, 2000.

BIENIAWSKI, Z. T., 1989. Engineering rock mass classification. New York: John Wiley. 248p, 1989.

BIENIAWSKI, Z. T., 2011. Misconceptions in the Applications of Rock Mass Classifications and their Corrections. Seminar on Advanced Geotechnical Characterization for Tunnel Design. ADIF. Madrid, Spain, 29 June, 2011.

CARNEIRO M. A. **O Complexo Metamórfico Bonfim Setentrional - Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais: Litoestratigrafia e evolução geológica de um segmento de crosta continental do Arqueano.** Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. 233p. 1992.

CARVER, K.R.; ELACHI, C.; ULABY, F.T. Microwave remote sensing from space. Proceedings of the IEEE, v. 73, p. 970-996. 1985.

CASAGRANDE, P. B. **O framework geodesign aplicado ao Quadrilátero Ferrífero (Minas Gerais/Brasil):** a Geologia como base de planejamento de futuros alternativos para o Quadrilátero Ferrífero. 2018. 127 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

CASTRO, P. T. A.; ENDO, I. GANDINI, A. L. Quadrilátero Ferrífero: avanços do conhecimento nos últimos 50 anos. 1. ed. Belo Horizonte: 3i editora, 2020. 480 p. Disponível em: <<https://em.ufop.br/files/LivrosQFE2050/QuadrilateroFerrifero-web5.pdf>> Acesso em: 10 abr. 2021.

COLESANTI, C.; FERRETTI, A.; NOVALI, F.; PRATI, C.; ROCCA, F. Monitoring of Progressive and Seasonal Ground Deformation. IEEE Transactions on **Geoscience and Remote Sensing**, v. 41, n. 7, p. 1685-1701. 2003.

COLESANTI, C.; WASOWSKI, J. Investigating landslides with space-borne Synthetic Aperture Radar (SAR) interferometry. **Engineering geology**, v.88. p.173-199. 2006.

CORDANI U. G., KAWASHITA K., MÜLLER G., QUADE H., REIMER V., ROESER H. Interpretação tectônica e petrológica de dados geocronológicos do embasamento na borda

sudeste do Quadrilátero Ferrífero, MG. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 52, n. 4, p. 785-799. 1980.

CROSETTO, M.; MONSERRAT, O.; CUEVAS, M.; CRIPPA, B. Spaceborne differential SAR interferometry: Data analysis tools for deformation measurement. **Remote Sensing**, v. 3, n. 2, p. 305-318, 2011.

DALLEMAND, J.F.; LICHTENEGGER, J.; RANEY, R.K.; SCHUMANN, R. radar imagery: theory and interpretation lecture notes. Rome: FAO. 103p. 1993.

DARES. Slope stability of open pit mines, InSAR technique allow preventing slope failures in open-pits. Disponível em: < <http://dares.tech/mining/>> Acesso em: 28 ago de 2021.

DEHLS, J. Permanent scatterer InSAR processing: forsmark, Swedish nuclear fuel and waste management Co., Stockholm Sweden, 34p. 2006.

DERBY O. The Serra do Espinhaço, Brazil. **Jour. Geol.**, 14(3): 374-401. 1906.

DORR, J. V. N. II; GAIR, J. E.; POMERENE, J. B.; RYNEARSON, G. A.. Revisão da estratigrafia pré-cambriana do Quadrilátero Ferrífero. Brazil Depart. Nac. Produção Mineral, Div. Fomento Produção Mineral, Avulso 81, 31p. 1957.

DORR, J. V. N. II. The Gandarela Formation: Soc. Bras. Geol. Bol., v. 7, nº. 2, p. 63-64. 1958.

DORR, J.V.N., Physiographic, Stratigraphic and Structural Development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. **USGS Professional Paper**, 641-A, 110 p. 1969.

DUTRA, G. M.; RUBBIOLI, E. L.; HORTA, L. S. Gruta do Centenário, Pico do Inficionado (Serra do Caraça), MG. In: SCHOBENHAUS, C.; CAMPOS, D. A.; QUEIROZ, E, T; WINGE, M. & BERBET-BORN, M. Sítios Paleontológicos do Brasil. Brasília: SIGEP-UNB, 2002. p. 41-59.

ENDO I. **Regimes Tectônicos do Arqueano e Proterozóico no Interior da Placa Sanfranciscana: Quadrilátero Ferrífero e Áreas Adjacentes, Minas Gerais.** 1997. Tese de Doutorado - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. São Paulo. 243p.

ENDO I., SILVA L. G., ZAVAGLIA G. **Projeto Brucutu-Dois Irmãos Mapeamento Geológico, Estratigrafia E Arcabouço Estrutural.** Relatório Interno - Convênio UFOP e Vale S.A. p. 38. 2004a.

ENDO I., OLIVEIRA A. H., PERES G. G. **Estratigrafia e Arcabouço estrutural da região da junção Serra do Curral - Sinclinal da Moeda, Quadrilátero Ferrífero.** Relatório Interno – Convênio UFOP - Vale S.A. p. 68. 2004b.

ENDO I., OLIVEIRA A. H., PERES G. G., GUIMARÃES M. L. V., LAGOEIRO L. E., MACHADO R., ZAVAGLIA. G., ROSAS C. F., MELO R. J. Nappe Curral: Uma megaestrutura alóctone do Quadrilátero Ferrífero e controle da mineralização. X Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos / IV International Symposium on Tectonics, Curitiba. Boletim de Resumos Expandidos, p. 279-282. 2005.

ENDO, I.; SILVA, A. G.; MARIANO, D. F.; ESPINOZA, J. A. A.; LOPES, A. P.; ANGELI, G. **Estratigrafia e arcabouço estrutural dos distritos ferríferos de Brucutu e Dois Irmãos, Quadrilátero Ferrífero, MG.** Relatório Final Vale S.A. (Projeto Brucutu-Dois Irmãos) – Convênio Vale-Universidade Federal de Ouro Preto-UFOP e Fundação Gorceix, Ouro Preto. 2008.

ENDO I., GALBIATTI H. F., DELGADO C. E. R., OLIVEIRA M. M. F. DE, ZAPPAROLI A. DE C., MOURA L. G. B. DE, PERES G. G., OLIVEIRA A. H. DE, ZAVAGLIA G., DANDERFER Fº A., GOMES C. J. S., CARNEIRO M. A., NALINI JR. H. A., CASTRO P DE T. A., SUITA M. T. DE F., TAZAVA E., LANA C. DE C., MARTINS- NETO M. A., MARTINS M. DE S., FERREIRA Fº F. A., FRANCO A. P., ALMEIDA L. G., ROSSI D. Q., ANGELI G., MADEIRA T. J. A., PIASSA L. R. A., MARIANO D. F., CARLOS D. U. 2019ª. Mapa Geológico do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. Escala 1:150.000: Uma

celebração do cinquentenário da obra de Dorr (1969). 2019a. Ouro Preto, Departamento de Geologia da Escola de Minas – UFOP - Centro de Estudos Avançados do Quadrilátero Ferrífero: www.qfe2050.ufop.br. Disponível em: <<https://qfe2050.ufop.br/mapa-geologico-do-quadrilatero-ferrifero-2019>> Acesso em: 10 abr. 2021.

ENDO I., DELGADO C. E. R. OLIVEIRA M. M. F. DE ZAPPAROLI A. DE C., CARLOS D. U., GALBIATTI H. F., CASTRO P. DE T. A., SUITA M. T. DE F., BARBOSA M. S. C., LANA C. E., MOURA L. G. B. DE. 2019b. Estratigrafia e Arcabouço Estrutural do Quadrilátero Ferrífero: Nota Explicativa do Mapa Geológico do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. Escala 1:150.000. Ouro Preto, Departamento de Geologia da Escola de Minas – UFOP - Centro de Estudos Avançados do Quadrilátero Ferrífero: www.qfe2050.ufop.br.

EUROPEAN SPACE AGENCY (ESA). About COSMO-SkyMed. European Space Agency. Italia, 2021. Disponível em: <<https://earth.esa.int/eogateway/missions/cosmo-skymed>> Acesso em 31junho de 2021.

EUROPEAN SPACE AGENCY (ESA). InSAR principles: guidelines for SAR interferometry, processing and interpretation. Noordwijk, The Netherlands: ESA Publications ESTEC (TM-19), p. 40. 2007.

FARINA F., ALBERT C., MARTINEZ DOPICO C., AGUILAR GIL C., MOREIRA H., HIPPERTT J.P., CUTTS K., ALKMIM F.F., LANA, C. The Archean-Paleoproterozoic evolution of the Quadrilátero Ferrífero (Brasil): Current models and open questions. **Journal of South American Earth Sciences**, p. 68:4-21. 2016.

FERRETTI, A.; PRATI, C.; ROCCA, F. Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in Differential SAR Interferometry. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 38. n.5. p. 2202–2212. 2000.

FERRETTI, A.; PRATI, C.; ROCCA, F. Permanent Scatterers in SAR Interferometry. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.39. n.1. p.8-19. 2001.

FERRETTI, A.; SAVIO, G, BARZAGHI, R.; BORGHI, A.; MUSAZZI, S.; NOVALI, F.; PRATI, C.; ROCCA, F. Submillimeter accuracy of InSAR time series: Experimental validation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. v. 45, n. 5, p. 1142–1153, 2007.

FIELDING, E. J.; BLOM, R. G.; GOLDSTEIN, R. M. Rapid subsidense over oil fields measured bt SAR interferometry. *Geophysical Research Letters*. v. 25, n.17, p.3215-3218. 1993.

FRANCESCHETTI, G. E LANARI, R. Synthetic aperture radar processing. Boca Raton, FL: CRC Press, 307p. 1999.

GABRIEL, A.K., GOLDSTEIN, R.M. E ZEBKER, H.A. Mapping small elevation changes over large areas: differential radar interferometry. *J. Geophys. Res.* 94 (B7), p. 9183–9191. 1989.

GAMA, F. F.; CANTONE, A.; MURA, J. C.; PASQUALI, P.; PARADELLA, W. R.; SANTOS, A. R.; SILVA, G. G. Monintoring Subsidence of Open Pit Iron Mines Carajás Province Based on SBAS Interferometric Technique Using TerraSAR-X Data. *Remote Sensing Applications: Society and Environment* v. 8, p. 199-211, 2017.

GAMA, F. F., W. PARADELLA, J. C. MURA AND C. OLIVEIRA. Advanced DINSAR analysis on dam stability monitoring: A case study in the Germano mining complex (Mariana, Brazil) with SBAS and PSI techniques. *Remote Sensing Applications: Society and Environment* 16. 2019.

GAMA, F. F.; MURA, J.C.; R. PARADELLA, W.; G. DE OLIVEIRA, C. Deformations Prior to the Brumadinho Dam Collapse Revealed by Sentinel-1 InSAR Data Using SBAS and PSI Techniques. *Remote Sens Applications: Society and Environment*. 2020, 12, 3664. Disponível em: < <https://doi.org/10.3390/rs12213664>>. Acesso em 14 de junho 2021.

GORCEIX, H., Notícias sobre cascalhos diamantíferos. In: Anais da Escola de Minas. Ouro Preto, n.3. p. 195-207. 1884.

HANSSEN, R.F. Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. The Netherlands. 2001.

HARTWIG, M.; PARADELLA, W.; MURA, J. Detection and Monitoring of Surface Motions in Active Open Pit Iron Mine in the Amazon Region, Using Persistent Scatterer Interferometry with TerraSAR-X Satellite Data. **Remote Sensing**. v. 5. p. 4719-4734. 2013.

HARTWIG, M. E. Detection of mine slope motions in Brazil as revealed by satellite radar interferograms. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**. v. 75. p. 605-621. 2016.

HEINECK C. A., SILVA L. C., LEITE C. A., VIEIRA V. S. SILVA M. A., BAARS F. J., PERROTA M., SALVADOR E. D., LOPES R. C., SILVA M. G. M., VALENTE C. R., LACERDA Fº J. V., DRUMOND J. B. V. 2003. Mapa Geológico de Minas Gerais, Escala 1:1.000.000. CD-ROM.

HERZ, N. Metamorphic rocks of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. In: **Geological Survey Professional Paper** 641-C: 1-81, 1978.

HOOPER, A., SEGALL, P. E ZEBKER, H. Persistent scatterer InSAR for crustal deformation analysis, with application to Volcán Alcedo, Galápagos. **J Geophys Res** 112: B07407. 2007.

INMET – INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (Brasil). Normais Climatológicas do Brasil. 2019. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas>. Acesso em: 24 abr. 2021.

ISRM - INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS. Suggested methods for the quantitative description of discontinues in rock masses. **Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech**. v. 15, n. 6, p. 319-368, 1978.

ITALIAN SPACE AGENCY. COSMO-SkyMed System Description & User Guide. Doc. No: ASI-CSM-ENG-RS-093-A. 2007. Disponível em: <<http://www.cosmo-skymed.it/docs/ASI-CSM-ENG-RS-093-A-CSKSysDescriptionAndUserGuide.pdf>>. Acesso em 20 de março de 2021.

IUGS - INTERNATIONAL UNION OF GEOLOGICAL SCIENCES. A suggested method for describing the rate of movement of a landslide. **Bulletin of the International Association of Engineering Geology**, v. 52, Issue 1, p. 75-78, 1995.

JORDT-EVANGELISTA H., MULLER G. Petrologia da Zona de Transição entre o Cráton do São Francisco e o Cinturão Móvel Costeiro na Região Sudeste do Quadrilátero Ferrífero, MG. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 34. Anais. Goiânia, 1986. p.1471-1479.

JUNG, H.C.; KIM, S.W.; JUNG, H.S.; MIN, K. D.; WON, J.S. Satellite observation of coal mining subsidence by persistent scatterer analysis. **Engineering Geology**, v. 92, p.1-13. 2007.

KAMPES, B. M. Radar interferometry - persistent scatterer technique. **Remote Sensing and Digital Image Processing**. Springer. V. 12, 2006.

KNAUER, L. O Supergrupo Espinhaço em Minas Gerais: considerações sobre sua estratigrafia e seu arranjo estrutural. **Geonomos**. Volume 5i1, (109). 2013.

KLEES, R.; MASSONNET, D. Deformation measurements using SAR interferometry: potential and limitations. *Geologie en Mijnbouw*. v.77. p. 161- 176. 1999.

LANA C., ALKMIM F. F., ARMSTRONG R., SCHOLZ R., ROMANO R., NALINI JR. H. A. The ancestry and magmatic evolution of Archaean TTG rocks of the Quadrilátero Ferrífero province, southeast Brazil. *Prec. Res.* 231, 157–173. 2013.

LANARI, R., MORA, O., MANUNTA, M., MALLORQUÍ, J.J., BERARDINO, P., SANSOSTI, E. A small-baseline approach for investigating deformations on full-resolution

differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, v. 42, n. 7, p. 1377-1386, 2004.

LAUKNES, T. R., SHANKER, A. P., DEHLS, J. F., ZEBKER, H. A., HENDERSON, I. H. C., & LARSEN, Y. Detailed rockslide mapping in northern Norway with small baseline and persistent scatterer interferometric SAR time series methods. *Remote Sensing of Environment*, 114(9), 2097–2109. 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.04.015>>. Acesso em 23 de jul 2022.

LEWIS, A.J.; HENDERSON, F.M. Radar Fundamentals: the geoscience perspective. In: HENDERSON, F.M.; LEWIS, A.J. (eds.) *Principles & applications of imaging radar – manual of remote sensing*. 3. ed. v. 2, Danvers, MA: John Wiley and Sons, Inc., p. 131-176. 1998.

LOWMAN JR.; P. D.; HARRIS; J.; MASUOKA; P.M.; SINGHROY; V. H.; SLANEY, V. R. Shuttle Imaging Radar (SIR-B) Investigations of the Canadian Shield: Initial Report. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. GE-25, n. 1, p. 55-66. 1987.

LUME ESTRATÉGIA AMBIENTAL LTDA. **Estudo de Impacto Ambiental (EIA). Ampliação da PDE Nordeste**. Belo Horizonte, 2007. 185 p.

LUME ESTRATÉGIA AMBIENTAL LTDA, **Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e Relatório de Impacto Ambiental**. Projeto Cava da Divisa, Volume Meio Físico, 2012.

MACCIOTTA, R.; HENDRY, M.T. 2021. Remote Sensing Applications for Landslide Monitoring and Investigation in Western Canada. *Remote Sens.* V. 13, p. 366. 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/rs13030366>>. Acesso em 05 de jun 2021.

MACHADO N.; NOCE C. M.; OLIVEIRA O. A. B. de; LADEIRA, E. A. Evolução geológica do Quadrilátero Ferrífero no Arqueano e Proterozóico Inferior, com base em geocronologia U-Pb. In: SIMPÓSIO GEOLOGIA MINAS GERAIS 5 E SIMPÓSIO GEOLOGIA BRASÍLIA 1, Belo Horizonte, 1989. p.1-5.

MAIZATTO J. R. **Estratigrafia e tectônica das rochas cenozóicas da bacia do Gandarela e da região do Gongo Soco, sinclinal do Gandarela, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais.**

(Trabalho de conclusão de curso) - Departamento de Geologia da Universidade Federal de Ouro Preto, 110p. 1993.

MARTIN, D. & STACEY, P. Cemented Sediments. Guidelines for Open Pit Slope Design in Weak Rocks, D. Martin and P. Stacey (eds.), CSIRO Publishing, Melbourne, Australia, 127-167. 2018.

MASSONNET, D., ROSSI, M., CARMONA, C., ADRAGNA, F., PELTZER, G., FEIGL, K. E RABAUTE, TH. The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry. **Nature**. vol. 364. nº6433, pp. 138-142. 1993.

MAXWELL C. H. Geology and ore deposits of the Alegria District, Minas Gerais, Brazil. USGS Prof. Paper., 341-J, 72p. 1972.

MDGEO. **Relatório do estudo hidrogeológico para subsidiar o pedido de outorga do sistema de rebaixamento do nível d'água da mina de Brucutu.** Gerência de Geotecnia e Hidrogeologia Vale. p. 269. 2021.

MENESES, P. R. & ALMEIDA, T. Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto. [S.l.]: Universidade Federal de Brasília, 2012. 276 p.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Boletim do Setor Mineral - outubro. 2020.** Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/geologia-mineracao-e-transformacao-mineral/publicacoes-1/boletim-do-setor-mineral/boletim-do-setor-mineral-2013-outubro-2020-dados-atualizados-ate-setembro-de-2020.pdf/view>> Acesso em 05 abril 2021.

MOREIRA, A.; PRATS-IRAOLA; P.; YOUNIS, M.; KRIEGER, G.; HAJNSEK, I.; PAPATHANASSIOU, K. P. A tutorial on Synthetic Aperture Radar. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine**, p. 6-43. 2013.

MOURÃO, M. A. A. Caracterização hidrogeológica do aquífero Cauê, Quadrilátero Ferrífero, MG. 2007. 297 f. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte, 2007.

MURA, J. C.; PARADELLA, W. R.; GAMA F. F.; SANTOS, A.; GALO, M.; CAMARGO O. P.; SILVA, A.Q.; SILVA, G.G. Monitoring of surface deformation in open pit mine using DInSAR time-series: a case study in the N5W iron mine (Carajás, Brazil) using TerraSAR-X data. In: INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICAL ENGINEERING – SPIE. Amsterdam: SPIE, 2014. v. 9243. p. 924311-1.

NG, A. H.; GE, L.; YAN, Y. LI X.; CHANG, H.; ZHANG, K.; RIZOS, C. Mapping accumulated mine subsidence using small stack of SAR differential interferograms in the Southern coalfield of New South Wales, Australia. **Engineering Geology**, v.115, p.1-15. 2010.

NG, A.; GE, L.; ZHANG, K.; LI, X. Estimating horizontal and vertical movements due to underground mining using ALOS PALSAR. **Engineering Geology**, v. 158, p.18-27. 2012.

NOCE C. M. Geocronologia dos eventos magmáticos, sedimentares e metamórficos na região do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. 1995. Tese (Doutorado em Geoquímica e Geotectônica) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. 1995. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44134/tde-05012016-154125/>>. Acesso em: abril, 2021.

OLIVEIRA, N. V.; ENDO, I.; OLIVEIRA, L. G. S. Geometria do sinclinal Gandarela baseada na deconvolução Euler 2d e 3d – Quadrilátero Ferrífero (MG). **Revista Brasileira de Geofísica**. 23(3): p.221-232. 2005.

PARADELLA, W. R.; MURA, J. C.; GAMA, F. F.; SANTOS, A. R.; CAMARGO, P. O.; GALO, M.; SILVA, A. Q.; SILVA, G. G. Detecção e Monitoramento de estabilidade de taludes e deformações superficiais em mina a céu aberto através de técnicas avançadas de interferometria diferencial de radar: uma avaliação nas minas de ferro de Carajás (N4E, N4W,

N5W) utilizando dados do Satélite TerraSAR-X. São José dos Campos: Inpe. Processo FAPESP 2010/51267-9. Terceiro Relatório (Final) científico. 2015a.

PARADELLA W. R.; FERRETTI, A.; MURA, J.C; COLOMBO, D.; GAMA, F. F.; TAMBURINI, A.; SANTOS, A.R.; NOVALI, F.; GALO, M.; CAMARGO, P. O.; SILVA, A.Q.; SILVA, G.G.; SILVA, A.; GOMES, L.L. Mapping surface deformation in open pit iron mines of Carajás Province (Amazon Region) using an integrated SAR analysis. *Engineering Geology*. v. 193. p. 61-78. 2015b.

PARADELLA, W. R.; MURA, J. C.; GAMA, F. F. **Monitoramento DInSAR para mineração e geotecnia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2021.

PINTO, C. A. **Detecção de deformações superficiais na mina do manganês do azul através da interferometria de radar orbital**. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. São Paulo, 161 p. 2015.

PINTO, C. A.; PARADELLA, W. R.; MURA, J. C.; GAMA, F. F.; SANTOS, A. R.; SILVA, G. G.; HARTWIG, M. E. 2015. **Applying persistent scatterer interferometry for surface displacement mapping in the Azul open pit manganese mine (Amazon region) with TerraSAR-X StripMap data**. *J. Appl. Rem. Sens.* 9 (1) 095978. 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1117/1.JRS.9.095978>>. Acesso em 19 de maio de 2021.

PERSKI, Z.; HANSSEN, R.; WOJCIK, A.; WOJCIECHOWSKI. InSAR analyses of terrain deformation near the Wieliczka Salt Mine, Poland. **Engineering Geology**, v. 106, p. 58-67. 2009.

RAPOSO F. O. Estratigrafia, petrografia e petrologia. In: Programa de levantamentos geológicos básicos do Brasil, Brasília, DF. **Folha Rio Espera**. Parte II, Capítulo 2. 1991. p. 27-88. CPRM/DNPM.

RAUCOULES, D.; MAISONS, C.; CARNEC, C.; LE MOVELIC, S.; KING, C.; HOSFORD, S. Monitoring of slow ground deformation by ERS radar interferometry on the Vauvert Salt

Mine (France): comparison with groundbased measurement. **Remote Sensing of Environment**, v. 88. p. 468-478. 2003.

REIS L. A., MARTINS-NETO M.A., GOMES N.S., ENDO I. A bacia de antepaís paleoproterozóica Sabará, Quadrilátero Ferrífero, MG. **Revista Brasileira de Geociências**. 32, 43-58. 2002.

RENGER, F. E.; NOCE, C. M.; ROMANO, A. W.; MACHADO, N. Evolução sedimentar do Supergrupo Minas: 500 Ma de registro geológico no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. **Geonomos**, 2(1): 1-11. 1994.

ROCCA, F.; PRATI, C.; GUARNIERI, A.M.; FERRETTI, A. SAR interferometry and its applications. **Surveys in Geophysics**, n. 21. p. 159-176, 2000.

ROSEN, P.A.; HENSLEY, S.; JOUGHIN, I.R.; LI, F.K.; MADSEN, S.N.; RODRÍGUES, E.; GOLDSTEIN, R. Synthetic aperture radar interferometry. **Proceedings of the IEEE**, v. 88, n. 3, p. 333-382, 2000.

SA, G.; FIGUEIREDO, R. P.; MAGALHÃES, F. Ruptura do Talude Sudeste da Mina de N4E: Um Estudo de Caso, Carajás, Estado do Pará. **Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental**, v. 3, p. 115-129, 2013.

SCHORSCHER H. D. Komatiitos na estrutura greenstone belt da Série Rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 30. Recife, 1978. **Anais da SBG**. p.292-293.

SILVA, F. R. **A paisagem do Quadrilátero Ferrífero, MG: Potencial para o uso turístico da sua geologia e geomorfologia**. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Departamento de Geografia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007. P. 144. Disponível em: <<http://www.bibliotecadigital.ufmg.br>>. Acesso em: 24 abril de 2021.

SOUSA, J., HOOPER, A., HANSSEN, R., BASTOS, L. E RUIZ, A. Persistent Scatterer InSAR: a comparison of methodologies based on a model of temporal deformation vs. spatial correlation selection criteria. **Remote Sensing Environ** 115(10):2652–2663. 2011.

SPIER, C.; OLIVEIRA, S. DE; SIAL, A.; RÍOS, F. Geochemistry and genesis of the banded iron formations of the Cauê Formation, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Prec. Res.* 152, 170–206. 2007.

SUITA M. T. F., ENDO I., ASSUMPÇÃO C. S., ALCÂNTARA R. M., MENEZES I. P. Metacumulados ultramáficos de Santa Rita de Ouro Preto (Ouro Preto): Esteatitos, intrusões acamadadas (máfico?) ultramáficas Paleoproterozoicas (?) e suas implicações. In: Simpósio de Geologia do Sudeste, Diamantina. Simpósio do Sudeste - Programação e Livro de Resumos. Diamantina, MG: **Sociedade Brasileira de Geologia**, Núcleos RJ, MG e SP, 2007. p.92-92. 2007.

TEIXEIRA DA COSTA M. 1961. Sedimentação e orogênese da Série de Minas: Ouro Preto, SICEG. *Soc. Interc. Cult. e Est. Geol.*, nº. 1, p. 55-61.

TREVETT, J. W. *Imaging radar for resources surveys*. London, UK: Chapman & Hall. 313p. 1986.

TRE Altamira. InSAR at a glance. Rome: Italian Space Agency. 2021. Disponível em: <<https://site.tre-altamira.com/insar/>>. Acesso em: 12 mar. 2021.

ULABY, F. T.; MOORE, R.K.; FUNG, A.K. *Microwave remote sensing active 160 and passive: from theory to applications*. North Bergen, NJ: Book-Mart Press, v. 3, p. 1065-2162. 1986.

VALE S.A., **Mapeamento Geológico-Geotécnico**, Procedimentos Operacionais Internos – Gerencia de Geotecnia e Hidrogeologia, 2019.

VALE S.A. **Relatório Anual Formulário 20-F**. Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: <<http://www.vale.com/brasil/pt/investors/information-arket/annualreports/20f/paginas/default.aspx>> Acesso em: 03 de abril de 2021.

VALE S.A. Especificações de produtos de minério de ferro da Vale - EPS-000245. Especificação de Produto ou Serviço/ Suporte Vale. p. 1-7. 2018.

VALE S.A. **Relatório Anual Formulário 20-F**. Rio de Janeiro, 2020. Disponível em: <<http://www.vale.com/brasil/pt/investors/information-arket/annualreports/20f/paginas/default.aspx>> Acesso em: 11 de março de 2021.

VALE S.A. **Relatório de Recursos-Modelo BRU_0519**. Gerência de Recursos Minerais Ferrosos Vale. p. 1-70. 2019.

WERNER, C.; WEGMULLER, U.; STROZZI, T.; WIESMANN, A. Interferometric point target analysis for deformation mapping. In: IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, (IGARSS). Proceedings. Toulouse, France, 2003. v. 7, p. 4362-4364.

WOODHOUSE, I. H. Introduction to microwave remote sensing. Boca Raton: Taylor & Francis. 370p. 2006.

WALM ENGENHARIA. **Mina Brucutu Revisão e Atualização Do Modelo Geológico-Geomecânico**. Relatório técnico interno Vale S.A., São Gonçalo do Rio Abaixo, 2021. v.1, p. 5-23.

YAOLONG Q.; ZHANG M.; QUI L.; TAN W.; SUN J.; HUGANG P.; XU W. Application of Ground-based Deformation Monitoring Radar in Mine Slope Monitoring-Taking a mine in Inner Mongolia as an example. IEEE International Conference on Signal, Information and Data Processing (ICSIDP), Chongqing, China, 2019, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICSIDP47821.2019.9173427.

YANG, C.; ZHANG, Q.; ZHAO, C.; JI, L.; ZHU, W. Monitoring mine collapse by DInSAR. **Mining Science and Technology**, v. 20, p. 696-700. 2010.

YANG, Z.; ZHIWEI L.; ZHU J.; WANG Y.; WU L. Use of SAR/InSAR in Mining Deformation Monitoring, Parameter Inversion, and Forward Predictions: A Review, In: **IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine**, vol. 8, no. 1, pp. 71-90. 2020.