



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA

IAGO SILVA REBOUÇAS

MODELAGEM GEOLÓGICA E GEOESTATÍSTICA DE RECURSOS MINERAIS:
MINA DE MEDRADO - ANDORINHAS/BA

FORTALEZA

2023

IAGO SILVA REBOUÇAS

MODELAGEM GEOLÓGICA E GEOESTATÍSTICA DE RECURSOS
MINERAIS:MINA DE MEDRADO - ANDORINHAS/BA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Geologia. Área de concentração: Recursos Minerais

Orientador: Dr. Sergio Roberto Bacelar Huhn

Coorientador: Dra. Ana Rita Gonçalves Neves Lopes Salgueiro

FORTALEZA

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

R1m Reboucas, Iago Silva.

Modelagem geológica e geoestatística de recursos minerais: : mina de Medrado - Andorinhas/BA /
Iago Silva Reboucas. – 2023.
101 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Programa de Pós-Graduação
em Geologia, Fortaleza, 2023.

Orientação: Prof. Dr. Sergio Roberto Bacelar Huhn.

Coorientação: Profa. Dra. Ana Rita Gonçalves Neves Lopes Salgueiro.

1. Modelagem 3D. 2. Sensoriamento Remoto e Aerogeofísica. 3. Geoestatística. 4. Vale Jacurici. 5.
Cromita. I. Título.

CDD 551

IAGO SILVA REBOUÇAS

MODELAGEM GEOLÓGICA E GEOESTATÍSTICA DE RECURSOS
MINERAIS: MINADE MEDRADO - ANDORINHAS/BA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós- Graduação em Geologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Geologia. Área de concentração: Recursos Minerais

Aprovada em: 17/07/2023

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Sergio Roberto Bacelar Huhn (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dra. Ana Rita Gonçalves Neves Lopes Salgueiro (Coorientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dra. Cynthia Romariz Duarte (Membro Interno)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Francisco Oliveira da Silva (Membro Externo)
Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)

A Deus, a minha família, amigos em especial à
grandes pessoas que me ajudaram nessa da
minha jornada: Maynara Maciel, Joyce
Shantala, Cláudio Ângelo, Matheus Miranda,
Thiago Evangelista, Daniele Lima, Cynthia
Romariz e Ana Rita.

AGRADECIMENTOS

Às Instituições FUNCAP, pelo apoio financeiro com a manutenção da bolsa de auxílio e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Também se faz agradecimento à empresa FERBASA pela disponibilização do banco de dados.

Ao Prof. Dr. Sérgio Roberto Bacelar Hühn e Profa. Ana Rita Gonçalves Neves Lopes Salgueiro pela excelente orientação e apoio durante a pesquisa.

Aos professores participantes da banca examinadora Dra. Cynthia Romariz Duarte e Dr. Francisco Oliveira da Silva pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

Aos seguintes colegas de laboratório e departamento, pelas reflexões, críticas e sugestões recebidas: Pedro Henrique, Kauê Almada, Linara Ivina, Matheus Edson, Eduardo Freire, Tomaz Neto, Luzia Suerlange, Daniel Silveira.

“Quando se fala em projetos de mineração, é comum surgirem muitas dúvidas sobre a descrição adequada do objeto de estudo, buscando detalhamento para uma melhor eficiência na extração dos recursos minerais. Por isso, é de extrema importância que haja uma caracterização acurada dos recursos contidos na área de implantação da atividade extrativista” (SILVA, 2016).

RESUMO

No Brasil, há uma grande variedade de depósitos minerais, que dentre eles, destacam-se os depósitos cromitíferos do Vale Jacurici no município de Andorinhas/BA. Dentro do complexo, o segmento das minas Ipueira-Medrado constitui-se como duas das principais minas de cromo do país. Portanto o objetivo principal do trabalho é uma nova análise da mina de Medrado, integrando dados geoquímicos, litológicos, processamento digital de imagens, aerogeofísica e análises geoestatísticas da área para a reavaliação do depósito e criação de modelos digitais 3D. Os dados utilizados são oriundos de diferentes fontes: geoquímica e litologia do depósito mineral (cedidos pela Ferbasa); dados radiométricos e magnéticos da aerogeofísica (fornecidos pela CBPM); e imagens óticas e de radar do sensoriamento remoto (adquiridos no site da USGS). A metodologia empregada neste trabalho envolve a integração de diversas técnicas de processamento de dados com o objetivo de desenvolver modelos geológicos tridimensionais em um ambiente 3D, utilizando a plataforma Studio RM. Para alcançar esse fim, foram utilizados dados provenientes de aerogeofísica e sensoriamento remoto para mapear os corpos geológicos presentes na superfície, proporcionando uma base sólida para o desenvolvimento desses modelos. O processo de criação dos modelos matemáticos seguiu uma abordagem clássica, envolvendo a construção sequencial de pontos, linhas e superfícies. Além disso, variogramas experimentais foram desenvolvidos, e análises geoestatísticas foram realizadas, fazendo uso de algoritmos como a Krigagem Ordinária e o Vizinho Mais Próximo. Essas etapas visavam criar modelos geoestatísticos e comparar os resultados obtidos com abordagens de modelagem mais tradicionais, como a cubagem clássica. Ao final desse processo, por meio do modelo geológico da mina de Medrado, foi possível obter uma compreensão mais profunda da estrutura dos corpos cromitíticos no Vale do Jacurici, trazendo assim um valioso conhecimento para o contexto geocientífico.

Palavras-chave: Modelagem 3D; Sensoriamento Remoto e Aerogeofísica; Geoestatística; Cromita; Vale Jacurici.

ABSTRACT

In Brazil, there is a wide variety of mineral deposits, among which the chromitiferous deposits of the Jacurici Valley in the municipality of Andorinhas/BA stand out. Within the complex, the Ipueira-Medrado mine segment constitutes two of the main chrome mines in the country. Therefore, the main objective of the work is a new analysis of the Medrado mine, integrating geochemical, lithological data, digital image processing, aerogeophysics and geostatistical analysis of the area for the reassessment of the deposit and creation of 3D digital models. The data used comes from different sources: geochemistry and lithology of the mineral deposit (provided by Ferbasa); radiometric and magnetic aerogeophysics data (provided by CBPM); and optical and radar images from remote sensing (acquired from the USGS website). The methodology used in this work involves the integration of several data processing techniques in order to develop three-dimensional geological models in a 3D environment, using the Studio RM platform. To achieve this end, data from aerogeophysics and remote sensing were used to map the geological bodies present on the surface, providing a solid basis for the development of these models. The process of creating mathematical models followed a classical approach, involving the sequential construction of points, lines and surfaces. Furthermore, experimental variograms were developed, and geostatistical analyzes were performed, using algorithms such as Ordinary Kriging and Nearest Neighbor. These steps aimed to create geostatistical models and compare the results obtained with more traditional modeling approaches, such as classic cubage. At the end of this process, through the geological model of the Medrado mine, it was possible to obtain a deeper understanding of the structure of the chromititic bodies in the Jacurici Valley, thus bringing valuable knowledge to the geoscientific context.

Keywords: 3D Modeling; Remote Sensing and Aerogeophysics; Geostatistics; Chromite; Jacurici Valley.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	–	Mapa de localização da área de estudo e litoestratigrafia de uma porção do Vale do Jacurici, com destaque para a região da área de estudo Ipueira-Medrado.....	21
Figura 2	–	Modelo ilustrando uma origem intrusiva para camadas de cromita. (a) E os prêmios da crosta terrestre, as localizações aproximadas dos três estágios. (b) Etapas em uma estrutura estrutural de lama de cromo 1–3: (1) Etapas estruturais de lama de cromo; (2) remobilização da lama rica em cromita e subida pelo conduto; (3) deposição da lama de cromita junto com os contatos litológicos.....	26
Figura 3	–	Seções representativas dos segmentos Ipueira, Medrado, Monte Alegre Sul e Várzea do Macaco, buscando ilustrar as correlações e divisões estratigráficas para o complexo Jacurici.....	29
Figura 4	–	Mapa de detalhe e seção estratigráfica da mina subterrânea do trecho de soleira Medrado, Ipueira Sul e Ipueira II. Laudo interno de mineração da Vale do Jacurici S.A.....	31
Figura 5	–	Esquema ilustrativo da modelagem geológica tridimensional	34
Figura 6	–	O primeiro bloco (a) diagrama representa a interpretação geológica. O segundo (b), representa a interpretação geológica em função do modelo de blocos.....	35
Figura 7	–	Representação do corpo mineral por modelos de blocos.....	35
Figura 8	–	Fluxograma de trabalho.....	40
Figura 9	–	Modelo Digital de Terreno baseado em estruturas de wireframes.....	45
Figura 10	–	Delimitação de zonas de assinaturas texturais do terreno extraído através da imagem de Radar do satélite Alos sensor	46

	Pulsar com luz artificial no azimute de 110° e 15° de incidência.....	
Figura 11	– Na imagem “D” é apresentado o RGB de cores falsas das APC. Já a figura “E”, está apresentando a figura com interpretação das zonas alinhadas N-S em linhas contínuas brancas.....	48
Figura 12	– (F) Produto ASA, com corpo anômalo central delineado em linha cor branca; (G) produto AGHT realçando o corpo central e alguns limites de bordas à oeste e nordeste da área de estudo; (H) produto da primeira derivada horizontal no eixo x realçando bordas.....	50
Figura 13	– (I) Produto Tilt Derivative, (J) Primeira derivada vertical realçando os lineamentos magnéticos, (K) Lineamentos Magnéticos e estruturas mapeadas pela CPRM. Todos os produtos apresentam sombreamento a 45°.....	51
Figura 14	– Domínios Magnéticos com a utilização da Amplitude do Sinal Analítico com Lineamentos Magnéticos extraídos da primeira derivada vertical e Tilt Derivative.....	52
Figura 15	– Canal do K com a área de estudo ao centro. (L’) Interpretação das respostas radiométricas do canal do K, classificado em baixo, médio e alto. Todos os produtos apresentam sombreamento a 45°.....	53
Figura 16	– (M) Canal do U com a área de estudo ao centro. (M’) Interpretação das respostas radiométricas do canal do U, classificado em baixo, médio e alto. Todos os produtos apresentam sombreamento a 45°.....	54
Figura 17	– (N) Canal do Th com a área de estudo ao centro. (N’) Interpretação das respostas radiométricas do canal do Th, classificado em baixo, médio e alto. Todos os produtos apresentam sombreamento a 45°.....	55
Figura 18	– (O) Composição Ternária RGB. (O’) Interpretações dos Domínios Radiométricos (Red: potássio; Green: tório; Blue: urânio).....	56

	(P) Resultados dos processamentos digitais das imagens de radar e ótica extração das informações em escala de 1:50.000.	
Figura 19	– (Q) Sobreposição para comparação dos resultados obtidos com mapeamento geológico e estrutural (ALMEIDA, 2017) (1:50.000). (Q) Sobreposição para comparação dos resultados obtidos com mapeamento geológico da CPRM (1:100.000) (OLIVEIRA, 2016).....	58
Figura 20	– (Q) Bordas das anomalias magnéticas. (Q') Sobreposição para comparação dos resultados obtidos (1:50.000).....	59
Figura 21	– Mapa de possibilidade de ocorrência de rocha máfica-ultramáfica (Lógica Fuzzy).....	61
Figura 22	– (S) Mapa ajustado com as litologias presente em bibliografias. (T) Mapa Final.....	63
Figura 23	– Furos de Sondagens do Modelo Geológico da porção norte em diferentes percepções. (M1) Vista em planta, (M2) Vista transversal, (M3) Vista em corte de seção com zoom nos furos radiais (em forma de leque).....	64
Figura 24	– Seções Geológicas do Modelo Geológico da porção norte em diferentes percepções. (M4) Vista em planta, (M5) Vista transversal, (M6) Vista em corte de seção com zoom na porção onde estão os corpos de minério tipo lump.....	65
Figura 25	– Furos de Sondagens do Modelo Geológico da porção centro-sul em diferentes percepções. (M1) Vista em planta, (M2) Vista transversal, (M3) Vista em corte de seção com zoom nos furos radiais (em forma de leque).....	66
Figura 26	– Seções Geológicas do Modelo Geológico da porção norte em diferentes percepções. (M4) Vista em planta, (M5) Vista transversal, (M6) Vista em corte de seção com zoom na porção onde estão os corpos de minério tipo lump.....	66
Figura 27	– Topografia da região da mina de Medrado em diferentes percepções. (M7) Vista em planta da topografia em cor RGB cores verdadeiras, (M8) Vista transversal, (M9) Vista em corte de seção, (M10) Vista em planta da topografia com textura litológica.....	67

Figura 28	–	Modelo de Blocos da porção norte da mina de Medrado em diferentes percepções realçando as litologias e o minério tipo lump e disseminado. (M11) Vista em planta, (M12) Vista transversal, (M13) Vista em corte de seção.....	68
Figura 29	–	Modelo de Blocos da porção norte da mina de Medrado em diferentes percepções realçando as litologias e o minério tipo lump e disseminado. (M11) Vista em planta, (M12) Vista transversal, (M13) Vista em corte de seção.....	69
Figura 30	–	Modelo de Blocos e realce do corpo de minério tipo Lump da região da mina de Medrado em diferentes percepções. (M14) Vista em planta, (M15) Vista transversal, (M16) Vista em corte de seção, (M17) Minério tipo Lump em visão transversal.....	70
Figura 31	–	Modelo de Blocos e realce do corpo de minério tipo Lump da região da mina de Medrado em diferentes percepções. (M14) Vista em planta, (M15) Vista transversal, (M16) Vista em corte de seção, (M17) Vista do minério tipo Lump.....	71
Figura 32	–	Seção do modelo de blocos da região da mina de Medrado, com realce das zonas de cisalhamento, falhas de empurrão à leste e sentido de empurrão.....	75
Figura 33	–	Modelo de blocos da porção norte da mina de Medrado com realce do sentido do plung da dobra, evidenciando o sentido da mineralização do minério tipo Lump.....	76
Figura 34	–	Modelo de blocos da porção norte da mina de Medrado com realce do sentido do plunge da dobra, evidenciando o sentido da mineralização do minério tipo Lump.....	76
Figura 35	–	Modelo Geológico geral da mina de Medrado combinando as porção norte e Centro-Sul com realce do sentido do plunge da dobra, evidenciando o sentido da mineralização do minério tipo Lump.....	77
Figura 36	–	Análise das populações de amostras do banco de dados do banco de dados da mina de Medrado.....	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Principais Componentes Litotectônicos da Porção Norte do Cráton do São Francisco.....	22
Tabela 2	– Características do Sensor ASTER.....	38
Tabela 3	– Dados de aerogeofísica (gamaespectometria e magnetometria).....	39
Tabela 4	– Reclassificação dos dados raster para composição do Mapa de Possibilidade da Ocorrência de Rochas Máficas-Ultramáficas.....	42
Tabela 5	– Dados estatísticos da Análise das Principais Componentes (APC).....	47
Tabela 6	– Contribuição das Bandas para criação das APC.....	47
Tabela 7	– Classes radiométricas.....	52
Tabela 8	– Volumetria geológica e cubagem do depósito de cromo da mina de Medrado.....	78
Tabela 9	– Estruturas dos semivariogramas gerados para variável Cr ₂ O ₃	80
Tabela 10	– Resultados oriundos da Validação Cruzada para a variável Cr ₂ O ₃	81

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1	–	Comparativo entre os resultados da Krigagem Ordinária, Vizinho Mais Próximo e Cubagem Clássica.....	82
-----------	---	---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AGHT	Amplitude do Gradiente Horizontal Total
APC	Análise das Principais Componentes
ASA	Amplitude do Sinal Analítico
ASF	<i>Alaska Satellite Facility</i>
BIF	Formação Ferrífera Bandada
CBPM	Companhia Baiana de Pesquisa Mineral
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
CSF	Cráton do São Francisco
DNPM	Departamento Nacional de Pesquisa Mineral
Dz	Derivada Vertical
EOS	<i>Earth Observing System</i>
FLAASH	<i>Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Hypercubes</i>
MDT	Modelo Digital de Terreno
SWIR	<i>Short Wavelength Infrared</i>
TIR	<i>Long Wavelength Infrared</i>
VNIR	<i>Visible Nature Infrared</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

- % Porcentagem
- © Copyright
- ® Marca Registrada

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	18
1.1	Apresentação.....	18
1.2	Objetivos.....	19
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	20
2.1	Localização da Área de Estudo.....	20
2.2.1	<i>Geologia Regional e Metalogenia de Depósitos de Cromo.....</i>	<i>22</i>
2.3	Mineralogia e Metalogenia de Depósitos de Cromo.....	23
2.3.1	<i>Distritos cromíticos do Vale do Jacurici.....</i>	<i>26</i>
2.3.1	<i>Complexo Cromitítico Ipueira-Medrado.....</i>	<i>27</i>
2.4	Geotecnologias na Mineração.....	31
2.4.1	<i>Sensoriamento Remoto e Aerogeofísica.....</i>	<i>32</i>
2.5	Modelagem tridimensional de recursos minerais.....	33
2.6	Geoestatística aplicada a modelagem de recursos minerais.....	36
2.6.1	<i>Variografia.....</i>	<i>37</i>
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	37
3.1	Material.....	37
3.1.1	Dados Geológicos.....	37
3.1.2	Sensoriamento Remoto.....	38
3.1.3	Aerogeofísica.....	38
3.2	Metodologia.....	39
3.2.1	Sensoriamento Remoto e Aerogeofísica.....	39
3.2.1.1	<i>Processamento Digital de Imagem.....</i>	<i>40</i>
3.2.1.2	<i>Análise da Principal Componente (APC).....</i>	<i>41</i>

3.2.1.3	<i>Tratamento dos Dados Aerogeofísicos</i>	41
3.2.1.4	<i>Integração dos Produtos</i>	42
3.3	Modelagem Geológica e Análise Estatística Exploratória	42
4	RESULTADOS	44
4.1	Sensoriamento Remoto e Aerogeofísica	44
4.1.1	<i>Análise Morfológica (Radar)</i>	45
4.1.2	<i>Análise das Principais Componentes (Imagens Óticas)</i>	46
4.2	Resultados Magnéticos	49
4.3	Resultados Radiométricos	52
4.4	Integração dos Dados	56
4.5	Lógica Fuzzy: Interpretação das Rochas Máficas-Ultramáficas	60
4.6	Mapa Geológico Final	61
4.7	Modelagem Geológica 3D	64
5	DISCUSSÕES	71
5.1	Sensoriamento Remoto e Aerogeofísica	71
5.1.1	<i>Sienito Itiúba</i>	72
5.1.2	<i>Unidade Santa Luz</i>	72
5.1.3	<i>Unidade Fazenda São Bento</i>	72
5.1.4	<i>Rochas Máficas-Ultramáficas do Complexo Vale do Jacurici</i>	73
5.2	Modelagem Geológica	74
5.3	Cubagem	77
5.2	Análise Geoestatística	78
6	CONCLUSÃO	82
	REFERÊNCIAS	86
	ANEXO – ARTIGO PUBLICADO (QUALES A2)	91

1 INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação

A indústria mineral, tanto metálica quanto não metálica, há muito tempo desempenha um papel essencial na economia nacional (DALLA COSTA *et al.*, 2017). À medida que o setor metalúrgico evoluiu durante o século XX, a cromita e outros minerais tornaram-se *commodities* essenciais, principalmente na produção de aço inoxidável (MALIOTIS, 1999). As ligas metálicas são a aplicação mais comum para o cromo, amplamente utilizado na fabricação de produtos do dia a dia. Nesse contexto, o complexo do Vale do Jacurici, na Bahia, possui as maiores reservas de cromita do mundo. Embora existam estudos nesta área sobre a mineralização do cromo com foco nas propriedades do depósito, não há estudos complementares que visem a sintetização de conceitos sobre os depósitos para dar suporte na caracterização e que proporcione um guia para novas linhas de pesquisa.

A cromita ($\text{FeO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$) é um dos minerais que produz o minério de cromo, o quinto elemento metálico mais utilizado na indústria depois do ferro, manganês, alumínio e cromo (SAMPAIO *et al.*, 2005). É um dos minerais industriais mais importantes do mundo em aplicações metálicas e não metálicas. É amplamente utilizado na metalurgia (80% uso global), refratários (1%) e na indústria química (8%) (ALMEIDA *et al.*, 2017; SAMPAIO *et al.*, 2005). Mineralizações de cromo (Cr) são quase exclusivamente encontradas em rochas ígneas plutônicas primárias e ultrabásicas e são membros da família de minérios ortomagmáticos.

África do Sul, Cazaquistão e Índia possuem as maiores reservas mundiais de cromita (mais de 90% das reservas totais) e são os principais polos produtores do metal (DALLA COSTA *et al.*, 2017). De acordo com o mais recente Resumo Mineral Brasileiro publicado pelo Departamento Nacional de Pesquisa Mineral (DNPM) em 2014, o Brasil é o único produtor de cromo do continente americano, com 0,13% das reservas mundiais, equivalente a 1,9 milhão de toneladas de reservas lavráveis e 570 mil toneladas de Cr_2O_3 contidas. Somando-se as reservas lavráveis e medidas, chega-se a 2,66 Mt de metal contido, com os recursos mais significativos nos estados da Bahia (33,53%), Amapá (32%) e Minas Gerais (20%) (LIMA & NEVES, 2016). Em 2014, o país produziu 716.674,87 toneladas de cromita compacta, concentrada, granulada e areia de cromita, totalizando 244.622,46 toneladas de Cr_2O_3 contido. Somente a Bahia respondeu por 70,80% da produção nacional, ou seja, 507.423,87 t de Cr_2O_3 com teor de Cr_2O_3 de 39% (LIMA & NEVES, 2016).

Este minério ocorre em camadas tabulares que variam de centímetros a dois metros de espessura e teores que variam de 30 a 48% de Cr_2O_3 . O minério estratificado, também denominado compactado, apresenta alternância de lâminas centrimétricas de cromita e serpentinita, e apresenta teores que variam de 15 a 30% de Cr_2O_3 . O tipo disseminado, apresenta variação de teor entre 10 a 20% de Cr_2O_3 e ocorre associado ao tipo compactado ou corpos isolados. O último é o friável, onde geralmente é encontrado associado à argila e à cromita disseminada, com variações de teores idênticas aos tipos disseminados e estratificados. Este último tipo tem origem na mineração disseminada e estratificada (LIMA, 2009).

O complexo máfico-ultramáfico do Vale do Jacurici é a principal mineralização de cromo em contexto nacional (FIGUEIREDO, 1977). É encontrada no Cráton do São Francisco, localizado a nordeste do estado da Bahia (ALKIMIM, 2004). O Bloco da Serrinha margeia o distrito cromítico. Ao final do Ciclo Transamazônico durante o Arqueano, o bloco foi consolidado e limitado pela Faixa Móvel Sergipana e Salvador-Curaçá (BARBOSA, 1997). A oeste do distrito estão o sienito da Serra de Itiúba e rochas de alto grau metamórfico conectadas à zona de cisalhamento dúctil da parte norte da Faixa de Itabuna (DE ALMEIDA, 2017). As rochas do Vale do Jacurici sofreram deformações e metamorfismo durante o Paleoproterozóico devido à colisão dos Blocos Serrinha, Gavião e Jequié (KOSIN *et al.*, 2003). O Complexo do Vale do Jacurici contém 22 rochas intrusivas máfico-ultramáficas contidas em granulitos e gnaisses no ambiente geológico do Bloco Serrinha. As minas de Ipueira e Medrado são duas das mais importantes em termos econômicos do país (FRIEDERICH, 2019).

Há notáveis trabalhos publicados em bancos de dados online sobre a região das minas do segmento Ipueira-Medrado sobre a geologia de superfície local e concepções das características gerais do depósito mineral. Dentre estes trabalhos, destacam-se trabalhos nas áreas de aerogeofísica (DIAS, 2021), mapeamento geológico (OLIVEIRA, 2016), geologia estrutural (DE ALMEIDA, 2017), caracterização petrológica, litogeoquímica e geologia (MARQUES *et al.*, 2003; GAMA, 2021). No entanto, novos ramos de pesquisa mineral ainda podem ser aplicados para descrição do depósito mineral, como análise geoestatística de dados para identificação das tendências das mineralizações, estudos geofísicos de eletrorresistividade para dimensionamento do corpo mineral e aplicação de novas técnicas de Sensoriamento Remoto para mapeamento de áreas potencialmente promissoras.

1.2 Objetivos

A remobilização do foco da exploração mineral na mina de Medrado se deu devido à crescente necessidade de se atingir níveis de extração cada vez mais profundos no subsolo, o

que acabou descompensando a balança do custo-benefício. Com isso, Medrado foi colocada em segundo plano, dando lugar às minas de Ipueira, onde a extração mineral passou a ser concentrada. Entretanto, com a evolução da tecnologia e a continuidade no consumo de cromo nas indústrias químicas e de ligas metálicas, surge a necessidade de se explorar novos alvos prospectivos e reavaliar quantitativamente os minérios presentes em minas já conhecidas. Esses novos alvos podem surgir tanto em novas áreas quanto através de dados de furos de sondagem já existentes.

Nesse contexto, o refinamento dos modelos geológicos existentes, através do uso de softwares que oferecem mais robustez aos processos de cubagem e a aplicação de técnicas avançadas de geoestatística, permite a verificação da continuidade dos minérios e proporciona uma caracterização atualizada para o modelo geológico. Assim, o presente trabalho científico tem como objetivo principal a descrição quantitativa e qualitativa da mina de Medrado, integrando dados de geoquímica, litologia, produtos de geoprocessamento de imagens de satélite e aerogeofísica, dados estruturais e análises geoestatísticas. Ao fim, os resultados dessas análises permitirão a montagem do modelo geológico da mina de Medrado, visando a contribuir para a compreensão e exploração mais eficiente.

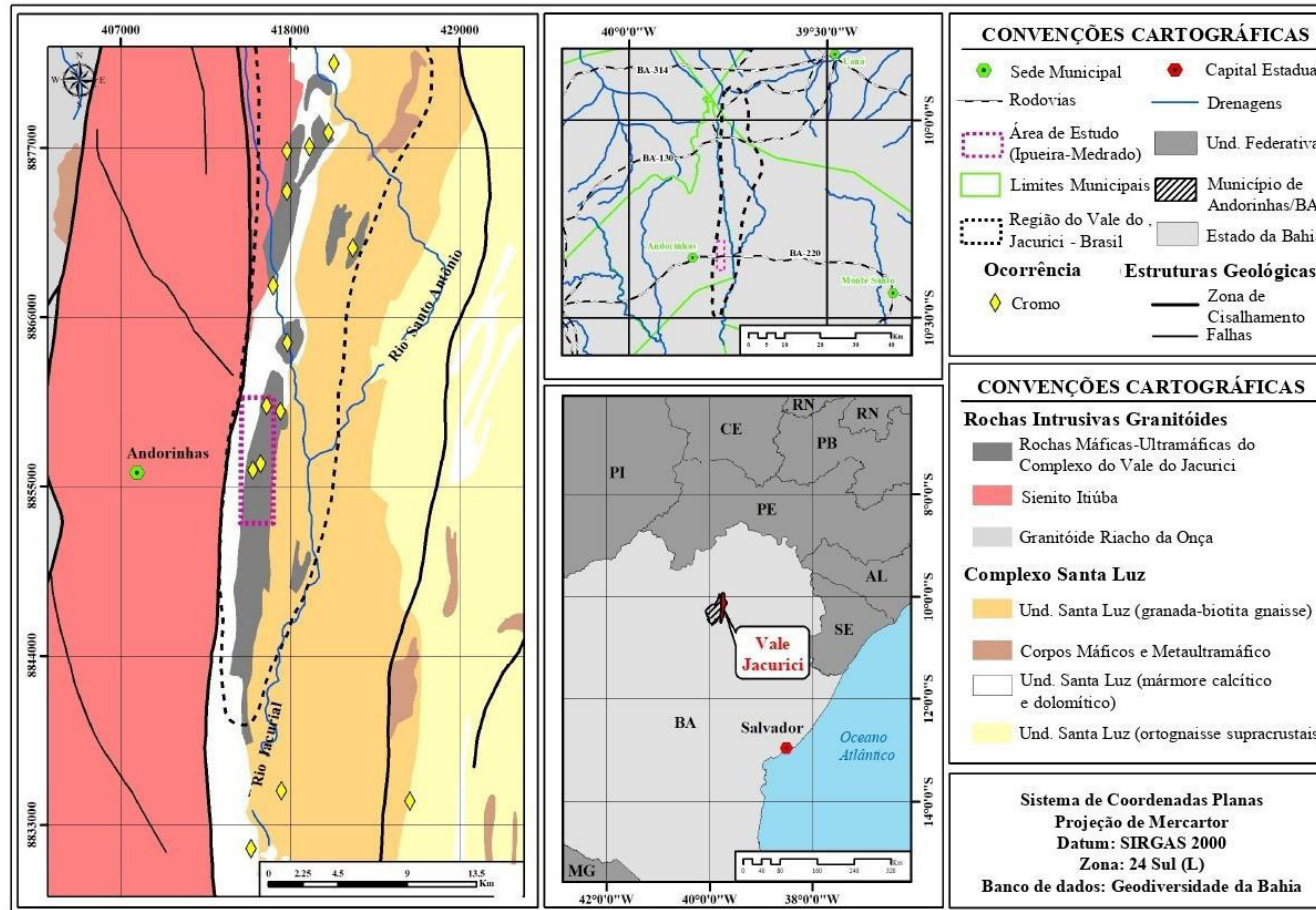
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Localização da Área de Estudo

A área de pesquisa situa-se no município de Andorinhas, na região geográfica do Piemonte Norte do Itapicuru, centro-norte baiano. Este município faz divisa com os municípios de Senhor do Bonfim, Monte Santo, Jaguarari, Itiúba e Uauá e está localizado a 450 quilômetros de Salvador, BA. Destaca-se na área, o complexo máfico-ultramáfico do Vale do Jacurici, parte integrante do Cráton do São Francisco (CSF) (Figura 1).

Em termos de datações, as rochas do Complexo do Vale do Jacurici e o sienito Itiúba datam de aproximadamente 2,0Ga e as rochas da Unidade Santa Luz de 2,9Ga.

Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo e litoestratigrafia de uma porção do Vale do Jacurici, com destaque para a região da área de estudo Ipueira-Medrado.



Fonte: CARVALHO (2010)

2.2 Geologia Regional e Metalogenia de Depósitos de Cromo

No contexto da evolução geológica regional, os crátons dos continentes sul-americano e africano são considerados porções internas mais estáveis das placas. Eles fundiram essas partes após colisões de segmentos cratônicos menores (BRITO NEVES *et al.*, 1999; CAMPOS NETO, 2000). As margens das placas e porções agregadas passaram a fazer parte dos cinturões orogênicos Brasileiro-Pan-Africano (ALKMIM, 2004).

A Faixa Móvel Brasília delimita o Cráton do São Francisco ao sul e a oeste, a Faixa Móvel Rio Preto a noroeste, ao norte as faixas Riacho do Pontal e Sergipana, e o cinturão Araçuaí a sudeste (ALMEIDA, 1977). Segundo Alkmim (2004), o centro do cráton contém coberturas Neoproterozóicas do Rio Preto e da Faixa Sergipana. Unidades pré-cambrianas e fanerozóicas cobrem seu interior, compreendendo três unidades morfotectônicas críticas: a Bacia do São Francisco, o Aulacógeno do Parnamirim e grande parte do rifte Recôncavo-Tucano-Jatobá (ALKMIM, 2004).

O Cinturão Mineiro é uma seção do embasamento exposto ao sul do Cráton durante o Evento Transamazônico, e foi submetido à deformação e atividade térmica (NOCE *et al.* 1998; MACHADO *et al.* 1992). Esses terrenos compreendem um complexo metamórfico de base e rochas supracrustais dos Supergrupos Rio das Velhas, Minas e Itacolomi. Granitos dos períodos Arqueano e Paleoproterozóico também estão presentes (ALKMIM, 2004).

Ao norte do Cráton, encontra-se um fragmento do orógeno paleoproterozóico (BARBOSA & DOMINGUEZ, 1996; TEIXEIRA *et al.*, 2000; BARBOSA & SABATÉ, 2001; ALKMIN, 2004). Esta seção é dividida em quatro grandes componentes litotectônicos, cada um com sua própria assinatura crustal e habitat (BARBOSA & DOMINGUEZ, 1996; TEIXEIRA *et al.*, 2000; BARBOSA & SABATÉ, 2001). Resumimos os quatro terrenos arqueanos na Tabela 1.

Tabela 1 – Principais Componentes Litotectônicos da Porção Norte do Cráton do São Francisco.

Componentes Litotectônicos	
Terrenos	Feições
Bloco Gavião	É composto por um núcleo arqueano que foi retrabalhado nas bordas. Encontram-se rochas mais antigas do Cráton do São Francisco. Sequências do <i>Greenstone Belt</i> , tonalito-trondhjemito-granodiorito (TTG) com idade de 3,4 Ga, duas gerações de granitóides com 3,2–3,1 Ga e outra com 2,7 Ga. A fácies anfíbolito metamorfoseou todas as rochas deste grupo.
Bloco Jequié	A maior parte da estrutura compreende migmatitos de 2,9 Ga e granitóides de 2,7 Ga. Exibe extrema deformação e metamorfismo transbrasiliano sob configurações de fácies granulíticas. Metassedimentos e metavulcânicas antigas podem aflorar partes do bloco.

Bloco Serrinha	Nas bacias retro-arcos, é marcado por um significativo metamorfismo significativo, e contém sequências de Greenstone Belt Paleoproterozóicas cobrindo parte do embasamento. O embasamento do bloco é composto por granitos e tonalitos de 2,9 Ga.
Cinturão Itabuna-Salvador-Curaça	O terreno é composto por tonalitos, trondhjemitos e metassedimentos. Sua característica principal é a configuração do arco magmático Neoarqueano/Paleoproterozóico. Devido à condição de convergência paleoproterozóica, metamorfismo e deformação na fácies granulítica podem ser notados. Rochas shoshoníticas foram encontradas.

Fonte: Adaptado de BARBOSA & DOMINGUEZ (1996), TEIXEIRA et al. (2000); BARBOSA & SABATÉ, (2001), ALKMIN (2004).

2.2.1 Mineralogia e Metalogenia de Depósitos de Cromo

Podemos encontrar o cromo na natureza como cromita e magnésio-cromita, ambos membros do grupo espinélio, que inclui minerais que contêm magnésio, cromo, ferro e alumínio em sua estrutura (SAMPAIO et al., 2005). A cromita é o único minério economicamente viável entre os minerais de cromo. Assim, este elemento se destaca nos minerais mais importantes: a cromita (FeCr_2O_4), a aluminocromita [$\text{Fe}(\text{CrAl})_2\text{O}_4$], a magnesiocromita ($\text{Mg,FeCr}_2\text{O}_4$) e a cromopicotita [$(\text{Mg,Fe})(\text{Cr,Al})_2\text{O}_4$] (Lima, 2009).

Segundo Sampaio *et al.* (2005), a cromita tem uma composição teórica de 68% Cr_2O_3 e 32% FeO , embora essas quantidades nunca sejam encontradas na natureza devido a implicações de impurezas. Dependendo do teor de Cr_2O_3 e da relação Cr/Fe , a cromita pode ser classificada como metalúrgica, química ou refratária (LIMA, 2009). Em termos cristalográficos, Sampaio *et al.* (2005) caracterizam a cromita como um óxido com estrutura do espinélio, com fórmula cristalográfica XY_2O_4 .

A gênese dos depósitos de cromita se deve à cristalização do mineral durante o resfriamento do magma, sendo a cromita a única fase *cumulus* (FERREIRA FILHO, 2002; SAMPAIO *et al.*, 2005). Os depósitos de cromita são formados pela fusão parcial do manto superior peridotítico. Para que o sistema entre no campo de estabilidade da cromita, segundo Ferreira Filho (2002), devem existir relações de fase específicas para a deposição de cromita na câmara magmática.

Podemos dividir os depósitos em duas classes com base no seu desenvolvimento: cromita podiforme e cromita compacta (estratiforme) (STOWE, 1994). Kropschot e Doebrich (2010) propuseram um terceiro grupo de cromititos associados a complexos máfico-ultramáficos zonados do Alasca-Uralianos (FRIEDERICH, 2018).

O primeiro tipo de depósito cromítico, são os podiformes. Esses depósitos se originam em torno das bordas das placas tectônicas de acreção da litosfera oceânica.

Mecanismos de obducção que os absorvem nas margens continentais os mantêm no continente (MOORES, 2003). Podemos encontrá-los nas mesmas rochas máfico-ultramáficas que as rochas estratiformes, mas a gênese de formação é diferente, tendo o ciclo de Wilson como base teórica de formação. Estes depósitos, em comparação com os estratiformes são de portes menores, mas com teores superiores de cromo e relações Cr/Fe. Os minérios deste tipo de depósitos, geralmente são do tipo compacto (*lump*: 30 a 48% de Cr₂O₄) (LIMA, 2009). Basaltos com características de travesseiro toleítico e enxames de diques básicos na maioria das regiões centrais são elementos típicos desse modelo de mineralização. O complexo máfico de gabros está logo abaixo da seção mais superficial, e o complexo ultramáfico (harzburgito, lherzolita e dunita) está próximo à base (MOORES, 2003).

Os estratiformes são depósitos cromíticos tabulares em leitos de intrusões ígneas e respondem por uma parcela significativa das reservas mundiais conhecidas de cromo, correspondendo a 90% do total (SAMPAIO *et al.*, 2005). Essas intrusões em forma de escudo conectam-se com intrusões máfica-ultramáficas em camadas e têm mais de 1,9 bilhão de anos (THAYER & JACKSON, 1972; SAMPAIO *et al.*, 2005). Intrusões de magma máfico-ultramáfico ligam-se a terrenos cratônicos e até episódios de rifting. Dunitos, peridotitos, piroxenitos e gabros estão entre as rochas que compõem esse grupo. Na zona máfica, a mineralização disseminada e maciça pode incluir até 90% ou mais de cromita e está associada a seções inferiores de intrusões (THAYER & JACKSON, 1972). Geralmente, o minério é encontrado mais friável (LIMA, 2009). O Complexo Máfico-Ultramáfico no Vale do Jacurici, no estado Bahia (Brasil), é um excelente exemplo desse tipo de depósito. Os Complexos Witwatersrand e Bushveld na África do Sul são os exemplos mais notáveis desses modelos genéticos.

No seu mecanismo de formação dos depósitos tabulares, novos influxos magmáticos dos mesmos processos intrusivos fraturam as mineralizações em eventos ou pulsos magmáticos subsequentes conhecidos como autólitos, que ocorrem entre as zonas máficas e ultramáficas. A cromita cristaliza na base da câmara magmática, e através da remobilização dos cristais, há uma subdivisão em dois grupos: *on-stage* e *off-stage* (Jackson, 1961; 1963; Eales, 2000; Friedrich, 2018).

Jackson (1961; 1963) sugeriu o primeiro conceito, *On-Stage*, baseado em observações de estratos cromíticos do Complexo *Stillwater* nos Estados Unidos. Neste cenário, Jackson (1963) determinou que os cristais de cromita se formam na base da câmara de magma. Como resultado, o magma deposita-se relativamente parado e sem transposição lateral,

resultando em um deslocamento cotético causado pela mistura do magma residente com um mais primitivo contaminado pela crosta (IRVINE, 1977).

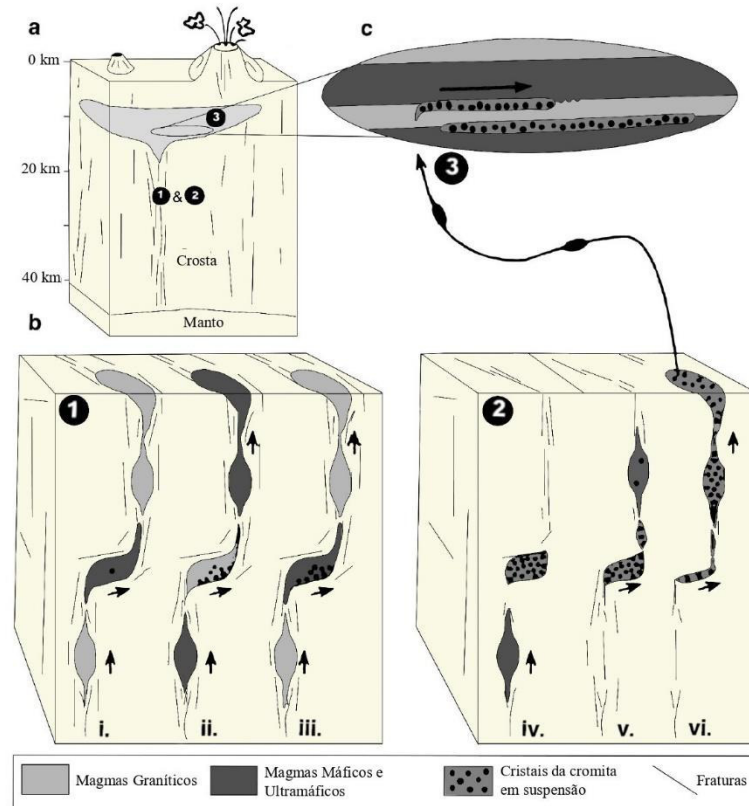
Jackson produziu trabalhos importantes em 1963 sobre variações laterais na razão de oxidação ($\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}+\text{Fe}^{3+}$) e flutuações na soma do ferro total ($\text{Fe}^{2+} + \text{Fe}^{3+}$) entre as camadas (FRIEDERICH, 2018). Ele ligou as diferenças a um gradiente lateral no $f\text{O}_2$ do magma durante o desenvolvimento da Zona Ultramáfica. A mudança está, portanto, ligada ao padrão de convecção da célula, à colocação dos dutos de alimentação ou mesmo à extração de água dos sedimentos intrudidos ao longo das bordas da intrusão (JACKSON, 1963).

Segundo Cameron (1980), as cromitas em câmaras cristalizam em função das variações de pressão globais. A cromita só pode cristalizar antes do piroxênio se a concentração inicial de Cr_2O_3 for superior a 0,2% em massa (Friederich, 2018). Nesta situação, o magma estaria próximo ao limite de precipitação da cromita, fazendo com que o sistema se deslocasse para o campo de estabilidade da cromita devido às flutuações de pressão. Outros autores postularam mudanças na pressão total causadas por bolhas de CO_2 , um aumento na câmara magmática e uma subsequente redução ou escape magmático como um agente de deslocamento em direção à borda olivina-cromita (LIPIN, 1993).

O modelo *off-stage* proposto por Eales (2000) afirma que, além da câmara magmática que formou o Complexo *Bushveld*, estaria presente uma segunda câmara contendo um magma mais rico em composição magnésiana e mais rico em Cr, onde ocorreriam processos de cristalização fracionada e assentamento gravitacional (FRIEDERICH, 2018). Segundo Friederich (2018), uma injeção magmática contendo até 3% de microfenocristais de cromita foi introduzida na câmara de *Bushveld* previamente cristalizada, enriquecendo em Cr através de líquidos intercúmulos desta segunda câmara. Além disso, Voordouw (2009) apresentou um conceito semelhante em que geraria cromita ao longo dos dutos alimentadores da câmara por causa de uma mistura de magmas fluindo pelo espaço e se acumulando em armadilhas estruturais (VOORDOUW, 2009). Segundo Friederich (2018), cristais de cromita reunidos em condutos seriam remobilizados e injetados na câmara de magma como soleiras por meio de uma lama de cromita contendo aproximadamente 53 a 62% de cromita (Figura 2). Seria necessário processar uma coluna de magma de 2,5 km de espessura e uma separação gravitacional perfeita entre cromita e olivina para criar uma camada de cromitito de um metro de espessura.

Figura 2 – Modelo ilustrando uma origem intrusiva para camadas de cromita. (a) E os prêmios da crosta terrestre, as localizações aproximadas dos três estágios. (b) Etapas em uma estrutura estrutural de lama de cromo 1–3: (1) Etapas estruturais de lama de cromo; (2) remobilização da

lama rica em cromita e subida pelo conduto; (3) deposição da lama de cromita junto com os contatos litológicos.



Fonte: Modificado de Voordouw (2009).

2.3 Distritos cromíticos do Vale do Jacurici

Três cinturões móveis Neoproterozóicos (Riacho do Pontal, Rio Preto, Sergipana, Araçua e Cinturão Brasileiro) restringem o complexo máfico-ultramáfico do Vale do Jacurici, localizado a nordeste do estado da Bahia e parte integrante do Cráton do São Francisco. As idades desse complexo variam de 2.085 a 5 Ma, o que equivale à idade do pico metamórfico da região (BARBOSA *et al.*, 1996; FRIEDERICH, 2019).

Neste complexo, diversos corpos intrusivos máfico-ultramáficas são intercaladas por rochas granulíticas e gnaisses (BARBOSA *et al.* 1996). Granodioritos a gnaisses leucocráticos tonalíticos com intercalações de anfibólito, formações ferríferas bandadas, olivina-mármore, cálcio-silicatos ricos em diopsídios, quartzitos, gnaisses granadeiros e metacherts são os litotipos mais comuns (MARINHO, 1986). Silveira *et al.* (2015) levantou a hipótese de meta-gabro-norita como a origem dos corpos anfibólicos anteriormente considerados sedimentares. Em contraste, Almeida *et al.* (2017) sugeriram intrusões cogenéticas ao Complexo Jacurici.

Os corpos cromíticos deste complexo encontram-se em contexto arqueano do bloco da Serrinha. As intrusões máfico-ultramáficas que ocorrem no complexo Vale do Jacurici,

segundo Dias *et al.* (2022), cobrem uma região com cerca de 70 km de comprimento e 20 km de largura, sendo a maioria orientada N-S.

Segundo Alves (2005), foram descobertos no Vale do Jacurici, 14 corpos cromíticos em 2005, com nomes que variam de norte a sul: Logradouro do Juvenal, Várzea do Macaco I, Várzea do Macaco II e Várzea/Teiú (município de Uauá); Monte Alegre, Cemitério, Riacho I, Riacho II, Barra, Algodões e Lajedo (município de Queimadas). Medrados, Pindoba, Ipueira/Socó e Pedra de Dórea (município de Andorinha); Laje Nova (município de Cansanção); e, finalmente, Barreiro e Pau Ferro (concelho de Queimadas). Friedrich (2019) afirma que 22 corpos máfico-ultramáficas já foram catalogadas em pesquisas mais recente.

Durante o Paleoproterozóico, as rochas do complexo Vale do Jacurici sofreram intensas deformações e eventos de metamorfismo associados às colisões dos blocos Serrinha, Gavião e Jequié (BARBOSA & SABATÉ, 2004). Os depósitos cromíticos do complexo Jacurici são alongados e orientados paralelamente ao *trend* regional (MARQUES & FILHO, 2003).

Segundo Marinho (1986), três eventos deformacionais dominaram os terrenos da região durante a formação dos depósitos, formando as dobras isoclinais e transpostas, dobras fechadas e lineamento das foliações nas direções NNE e NNW. Altos graus metamórficos (anfíbolitos) afetaram essas rochas, de acordo com Del Lama (2001). Também ocorreram eventos de metassomatismo pós-pico metamórfico, produzindo processos de serpentinização e flogopitização.

No Brasil, existem outros depósitos cromíticos com diferentes modelos de evolução, mas de grande importância para o conhecimento genético destes depósitos, são os Complexos Bacuri (Amapá) e Niquelândia (Goiás). Além disso, os dois complexos, juntamente com o complexo Ipueira-Medrado, apresentam uma estratigrafia ígnea distinta, reforçando ainda mais sua singularidade devido ao ambiente interno de formação (FERREIRA FILHO, 2002).

2.3.1 Complexo Cromítico Ipueira-Medrado

A mina Medrado e Ipueira está localizada no distrito cromítico do Vale do Jacurici, na borda oeste do Bloco Serrinha, margeando o Cinturão Salvador-Curaçá, e nela existem muitos depósitos econômicos e várias ocorrências de cromita hospedadas em rochas máfico-ultramáficas (ALMEIDA *et al.* 2017; BARBOSA *et al.*, 1996).

As minas de cromo encontram-se estruturalmente em uma soleira máfico-ultramáfica, que abriga o maior depósito de cromita do Brasil. O corpo geológico é descrito

como uma forma alongada, com 7 km de extensão e 300 m de espessura, com uma camada contínua de cromitito de 5 a 8 metros de espessura, mineralizada dentro da zona ultramáfica (MARQUES & FERREIRA FILHO, 2003). Alguns autores também mencionam que o corpo apresenta uma forte diferenciação e estratificação, originada de magmatismo primitivo e contaminação crustal (DEUS & VIANA 1982).

Nos corpos geológicos das minas em questão, as rochas são intercaladas por rochas gnáissicas e metassedimentares de alto grau metamórfico. Os litotipos encontrados são gnaisses bandados migmatizados, granulitos, metacherts, quartzitos, diopsitos e olivina-mármore (ALMEIDA *et al.*, 2017). A soleira da mina Ipueira, que corresponde ao prolongamento da soleira do Medrado (flanco leste), apresenta litotipos com sequências metassedimentares que incluem serpentina, mármore, diopsídio e metacherts (ALVES, 2005).

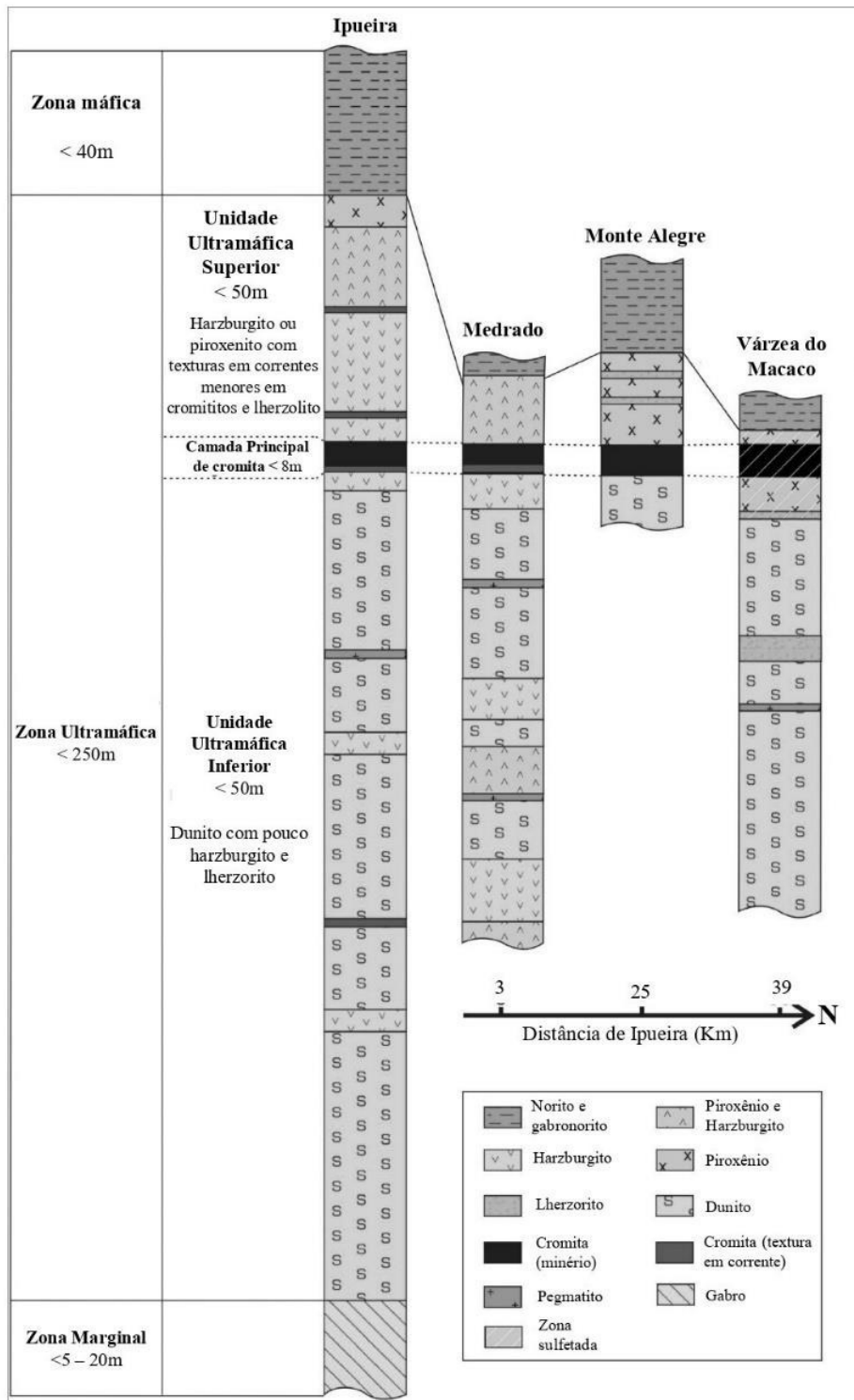
O depósito cromitítico é dividido em três zonas (Figura 3) usando o seguinte empilhamento estratigráfico de soleiras: marginal (5 a 20 m de espessura), ultramáfica (até 250 m de espessura; a camada é subdividida em superior e inferior) e máfica (aproximadamente 30 m de espessura) (MARQUES & FERREIRA FILHO, 2003). O cromitito acamadado presente nas soleiras é representado por uma granulometria que varia entre 0,4 a 0,6mm, pouco disseminado e apresenta contatos bruscos com a rocha encaixante.

Segundo Deus & Viana (1982), as olivinas e piroxênios nestes depósitos apresentam mudanças na composição, com minerais ricos em Mg no topo do depósito e minerais ricos em Fe na base. Esta situação mostra possíveis misturas magmáticas recentes injetadas com o magma residente através de fluxo convectivo durante o resfriamento do magma. A soleira Ipueira-Medrado divide-se em sete unidades de estratos (MARQUES & FERREIRA FILHO, 2003).

Marques & Ferreira Filho (2017) publicaram correlações estratigráficas entre as camadas cromíticas de Ipueira e Medrado entre si, e entre Monte Alegre Sul e Várzea do Macaco através das divisões sugeridas para o complexo Jacurici (Figura 3).

Figura 3 – Seções representativas dos segmentos Ipueira, Medrado, Monte Alegre Sul e Várzea

do Macaco, buscando ilustrar as correlações e divisões estratigráficas para o complexo Jacurici.



Fonte: Adaptado parcialmente de Marques & Ferreira Filho (2003).

Marques & Ferreira Filho (2003) descrevem que os depósitos Ipueira-Medrado foram formados em unidade. Porém, através de processos de cisalhamento, o corpo original foi dividido em dois grupos que conservaram características litológicas e estruturais semelhantes.

Regionalmente, as rochas sofreram intensos eventos de metamorfismo (alto grau metamórfico) e deformação, com temperaturas mínimas da fácies anfíbolito (ALMEIDA *et al.*, 2017). Alves (2005) afirma que o alongamento e a descontinuidade resultam principalmente de uma compressão leste-oeste causada por flexões e transposições na direção N-S.

Almeida *et al.* (2017) explicam que a evolução dos corpos cromitíticos máfico-ultramáficos ocorreu de forma semelhante à rocha hospedeira gnáissica. Também explica, que essas configurações nos controles estruturais permitiram o desenvolvimento de corpos em escala de mina (espessura entre 7 e 8 m) em ambos os lados da dobra. A repetição das camadas de cromita pode estar relacionada a zonas de cisalhamento identificadas tanto regionalmente quanto localmente.

Devido aos processos compressivos durante a formação do depósito, os níveis cromitíticos também ocorreram em formas de corpos alongados paralelos com a charneira das dobras sinformes. A dobra sinforme de Medrado é normal, com uma superfície axial mergulhando de 20° a 30°, com uma leve inclinação em seu eixo a sudoeste (ALMEIDA *et al.*, 2017). A dobra Ipueira configura-se como uma sinforme reversa, na qual ambos os flancos mergulham para leste com inclinação sudoeste de 10 a 15° (ALMEIDA *et al.*, 2017).

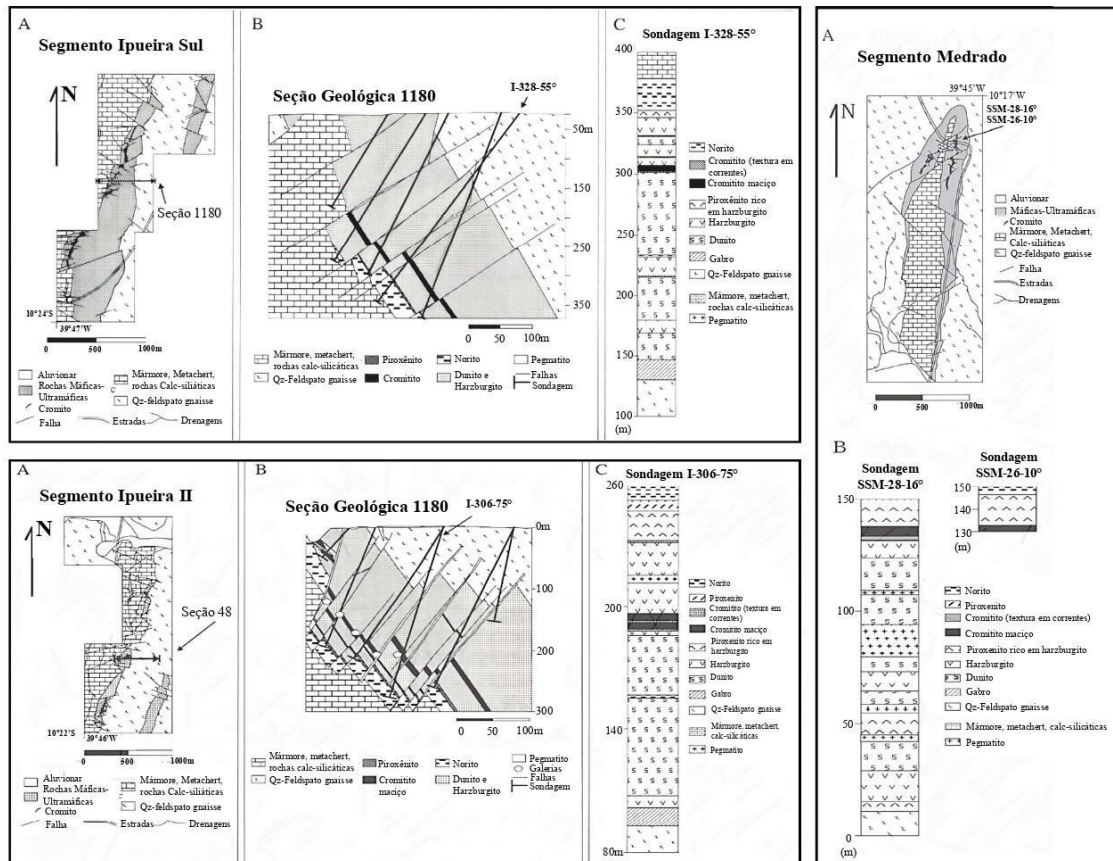
Em termos gerais, os depósitos cromitíticos Ipueira-Medrado estão correlacionados com modelos do Complexo Busheveld (BIONDE, 2015). Essa correlação é motivada por sua origem genética, estruturando-se na câmara magmática e ambiente de formação. Um forte argumento que sustenta os traços que aproximam os dois modelos (Ipueira-Medrado com Busheveld) é a presença da formação de depósitos de níquel associados a corpos máfico-ultramáficos. Depósitos de níquel, semelhantes ao cromo, são gerados durante processos de segregação magmática e se alojam na porção inferior da câmara. Em termos geotectônicos, outra forte semelhança entre ambos os complexos é sua origem de formação, onde ambos se correlacionam com áreas cratônicas pré-cambrianas.

Quando abordadas sob a ótica do extrativismo mineral, as jazidas Ipueira-Medrado são subdivididas em três segmentos: Medrado, Ipueira II e Ipueira Sul (Figura 4) (MARQUES & FERREIRA FILHO, 2003). O minério nessas minas está hospedado em serpentinitos, onde podem variar em ocorrências disseminadas ou maciças, cujos teores, segundo Figueiredo (1977), podem chegar a até 70%.

O *sill* de Medrado-Ipueira abriga um depósito significativo de cromita, com uma reserva total de quase 8 milhões de toneladas, de acordo com o estudo de Mello *et al.* (1986). Avena Neto & Sá (1984) relataram a presença de metais do grupo da platina associados aos cromititos. Em Medrado, foram obtidos resultados variando de <10 a 37 ppb de platina, <1 a

20,7 ppb de paládio e 44 a 3.450 ppm de Ni, sendo que os melhores resultados foram encontrados nos cromititos.

Figura 4 – Mapa de detalhe e seção estratigráfica da mina subterrânea do trecho de soleira Medrado, Ipueira Sul e Ipueira II. Laudo interno de mineração da Vale do Jacurici S.A.



Fonte: parcialmente adaptado de Marques & Ferreira Filho (2003)

2.4 Geotecnologias na Mineração

Devido à sua ampla aplicabilidade, seja em âmbito industrial, ambiental ou social, as geociências desenvolveram pesquisas fundamentadas na resolução dos dilemas socioambientais e econômicos. Em busca de suprir as necessidades advindas da sociedade, as geociências passaram a incorporar gradualmente a tecnologia em suas pesquisas e aplicações.

De acordo com BITAR (2000), as geotecnologias estão conectadas à necessidade de caracterização, avaliação e solução de problemas decorrentes da contínua relação entre as atividades humanas e o meio físico-geológico. Portanto, seja por meio da construção de obras de engenharia e recursos hídricos ou mesmo pela exploração mineral, essas tecnologias passaram a ser usadas como solução para diversos tipos de problema. Na mineração, não seria diferente, as geotecnologias ganharam seu espaço, contribuindo para a acessibilidade na aquisição dos dados e a qualidade dos resultados.

Devido à ampla cadeia processual da mineração, as geotecnologias passaram a ser aplicadas em várias fases deste segmento. Elas são utilizadas na etapa de processamento de imagens de satélite e interpretação destas, bem como na aquisição de dados geofísicos e geodésicos. Além disso, são aplicadas na sintetização das informações e na modelagem computacional em projeções 2-D, 3-D ou até mesmo 4-D de reservas minerais. Essas tecnologias contribuem para aprimorar a eficiência e a precisão da mineração, permitindo uma gestão mais eficiente dos recursos minerais disponíveis. É importante destacar que o uso das geotecnologias na mineração é uma prática crescente e indispensável, tanto no Brasil quanto em outros países.

2.4.1 Sensoriamento Remoto e Aerogeofísica

O sensoriamento remoto e os dados aeromagnéticos e radiométricos são técnicas de coleta de dados utilizadas na mineração. O sensoriamento remoto consiste na aquisição de imagens da superfície terrestre por meio de sensores instalados em satélites, aviões ou drones. Já os dados aeromagnéticos e radiométricos são obtidos por meio de sensores aerotransportados que medem as anomalias magnéticas e radiométricas do subsolo.

Essas técnicas são amplamente utilizadas na indústria mineral para a identificação de áreas com potencial mineral, a delimitação de corpos geológicos, a caracterização de alterações hidrotermais e a identificação de zonas de alteração mineral. Além disso, elas permitem a análise da distribuição espacial de elementos químicos e a estimativa de teores de minerais em jazidas.

Entre as técnicas utilizadas para a análise de dados de sensoriamento remoto aplicadas à mineração, destacam-se a Análise das Principais Componentes (APC) (CROASTA, 1992) e a extração de assinaturas texturais dos dados de imagens orbitais Aster e Palsar. Para delimitar as anomalias magnéticas e radiométricas, podem ser utilizadas técnicas como filtros *tilt* derivativo do campo magnético (*Tilt Derivate*) (Verduzco *et al.*, 2004), Amplitude do Sinal Analítico (ASA) (LI, 2006), Amplitude do Gradiente Horizontal Total (AGHT) (Cooper & Cowan, 2008), 1ª Derivada do Campo Magnético Total e a 1ª Derivada Vertical (PEIXOTO, 2016).

Os dados obtidos por meio do sensoriamento remoto e dos sensores aeromagnéticos e radiométricos são processados e analisados por meio de softwares de geoprocessamento e de modelagem geológica. Essas técnicas são fundamentais para a otimização dos processos de exploração mineral, pois permitem uma melhor compreensão das características do depósito mineral, aprimorando a tomada de decisão e reduzindo os custos de exploração.

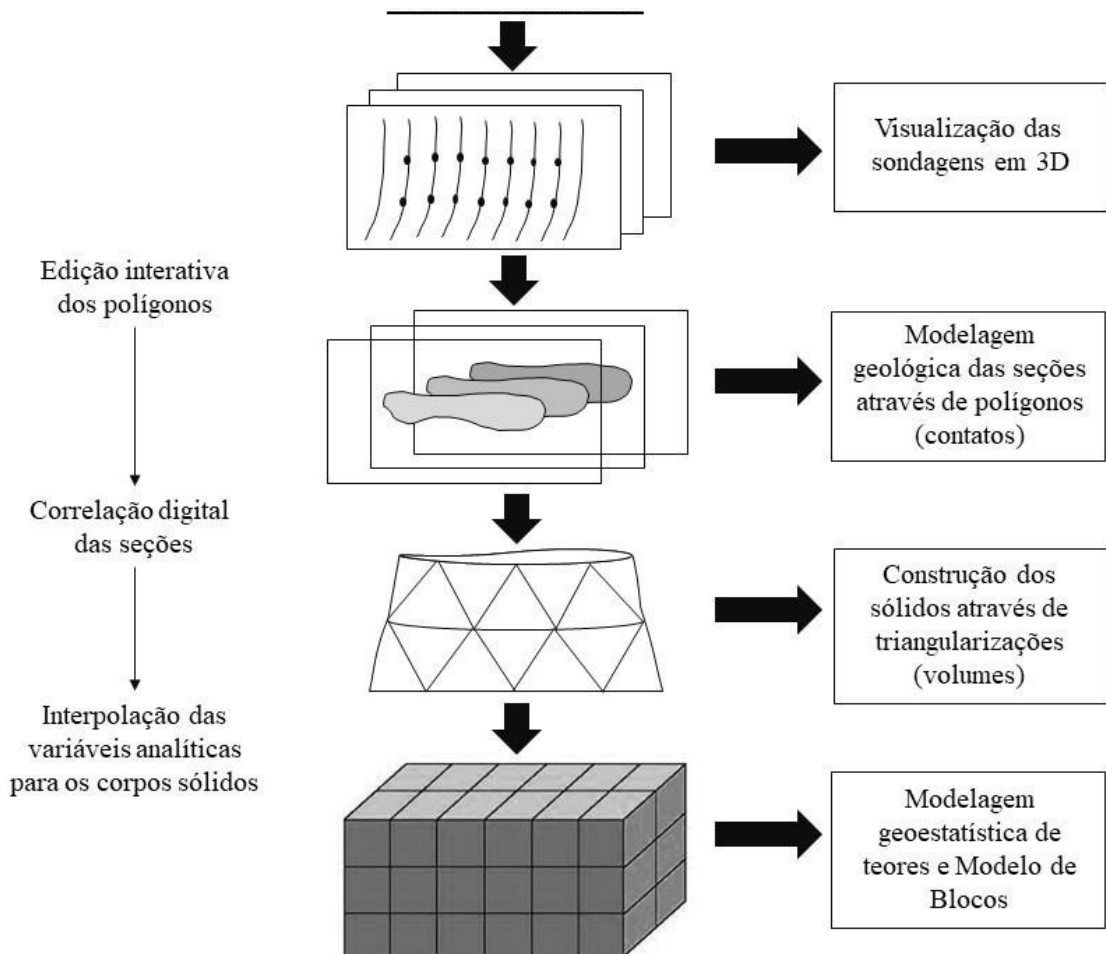
2.5 Modelagem tridimensional de recursos minerais

Quando se fala em projetos de mineração, é comum surgirem muitas dúvidas sobre a descrição adequada do objeto de estudo, buscando detalhamento para uma melhor eficiência na extração dos recursos minerais. Por isso, é de extrema importância que haja uma caracterização acurada dos recursos contidos na área de implantação da atividade extrativista (SILVA, 2016).

As propriedades geológicas apresentam variação espacial, ou seja, podem ser apresentadas através de medidas em números reais ou categorizadas, e podem mudar de acordo com controles estruturais ou estratigráficos (SILVA, 2001). Devido à influência direta na formação dos depósitos, esses controles exigem informações refinadas para a caracterização das porções aflorantes, bem como em subsuperfície. Silva (2001) explica ainda que as investigações são realizadas por meio de interpolação de dados de testemunhos de furos de sondagens, permitindo a descrição e a qualificação das unidades com atributos geológicos semelhantes.

A organização sequencial e espacial das amostras de testemunhos de sondagens permite a criação de seções verticais, que quando combinadas, possibilitam a construção de modelos baseados nas informações obtidas nos testemunhos. Conforme explica Silva (2001), ao desenvolver essas seções em meio computacional, é possível realizar a modelagem geométrica, gerando polígonos que sintetizam as áreas com os mesmos atributos geológicos. A união dos polígonos criados a partir dos objetos de superfície resulta na construção de um sólido tridimensional, cuja geometria do volume representa os atributos geológicos contidos. A Figura 5 apresenta um esquema que demonstra o método empregado por meio computacional para realizar a modelagem geológica.

Figura 5 – Esquema ilustrativo da modelagem geológica tridimensional



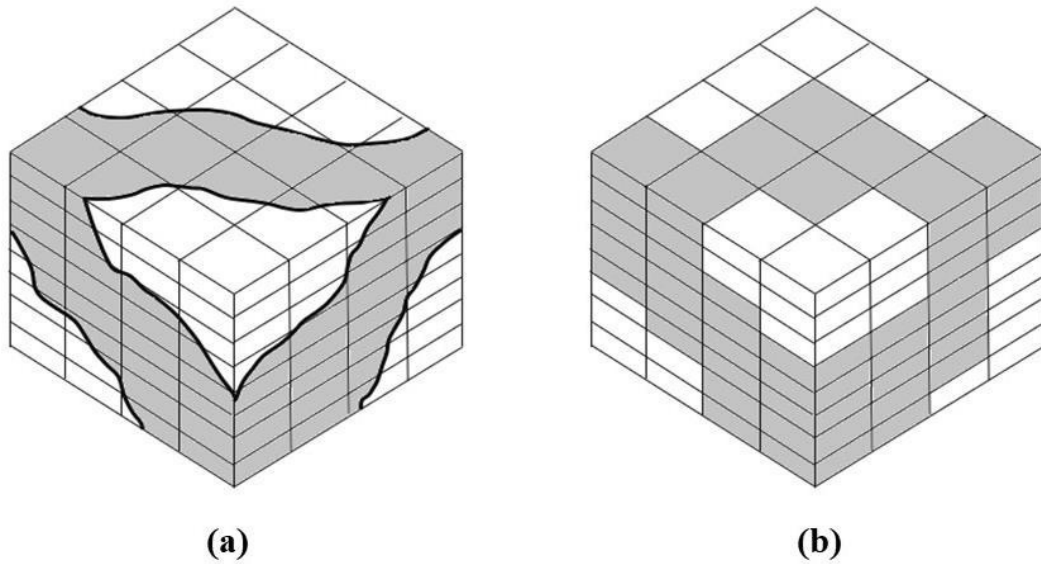
Fonte: Adaptado de Kavouras (1995) apud Silva (2001)

Muitos depósitos minerais apresentam estruturas complexas, o que dificultou por muito tempo a modelagem tridimensional por meio computacional (RENNARD & COURIOUX, 1999). Hoje, no entanto, os planejadores de minas utilizam sistemas computacionais que representam o meio geológico por meio de modelos de blocos regulares tridimensionais (CAMPOS, 2017). Esses modelos foram inicialmente adotados por sua geometria regular, que se assemelhava aos padrões retangulares das operações de desmonte. As dimensões dos blocos são determinadas pelas características dos equipamentos, estruturas geológicas, altura de bancos, entre outras (CAMPOS, 2017). Para construir os modelos de blocos, a metodologia clássica inicia com a interpretação geológica das seções, que permitem a criação dos modelos 3D conhecidos como modelo de wireframes ou superfície de wireframes.

Com as superfícies (wireframes) do modelo já definidas por meio de técnicas de triangularização e método de modelagem por seções, o corpo mineral passa a ser subdividido

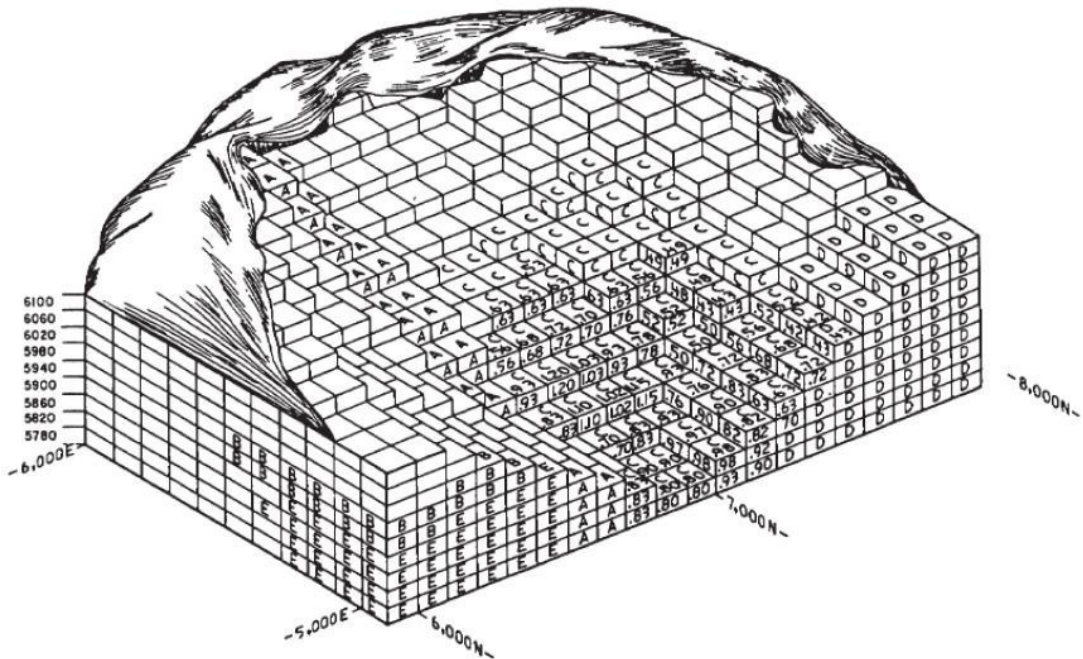
em blocos regulares em três dimensões (Figura 6) com coordenadas estabelecidas. A Figura 7, mostra a representação final do corpo geológico através de modelos de blocos.

Figura 6 – O primeiro bloco (a) diagrama representa a interpretação geológica. O segundo (b), representa a interpretação geológica em função do modelo de blocos.



Fonte: Adaptado de DARLING, 2011

Figura 7 – Representação do corpo mineral por modelos de blocos



Fonte: CRAWFORD & DAWEY, 1979 apud HUSTRULID & KUCHTA 2013

De acordo com SILVA (2001), as principais vantagens do modelo 3D estão relacionadas a possibilidade de reproduzir e elaborar diferentes cenários, atualizar e ajustar os modelos para novas informações de modo mais eficiente e rápido.

Após a estruturação do modelo de blocos do corpo mineral, as unidades dos blocos precisam apresentar valores e atributos. Estas informações, são introduzidas nos blocos por técnicas de interpolação, atribuindo-lhes informações de teor de minério, densidades, litotipos correspondentes as amostras, dentre outros atributos.

2.6 Geoestatística aplicada a modelagem de recursos minerais

A etapa de estimativa dos recursos minerais envolve a realização de processos matemáticos para obtenção dos valores de tonelagem do corpo mineral, teor de minério, tamanho, forma e localização dos depósitos (DARLING, 2011). Para realizar essa estimativa, é importante fazer uma análise prévia dos dados por meio de estatística clássica, que permite conhecer as características dos dados e analisar a distribuição espacial deles. Com isso, é possível inferir e obter diferentes informações dos dados, como diferentes populações indicando litologia e/ou mineralizações diferentes, estabelecendo teor de minério, dentre outras informações (FERNANDES, 2009).

Para atingir os objetivos de extração dos dados estatísticos, devem ser calculadas as medidas de tendência central (média, mediana e moda), e as medidas de dispersão em torno da média, que se constituem pela variância, o desvio padrão e o coeficiente de variação (FERNANDES, 2009).

A geoestatística surgiu inicialmente voltada para a resolução de problemas na mineração na etapa de estimativa de recursos e reservas minerais, e posteriormente, passou a ser empregada em outras áreas. Dentro da mineração, ganhou destaque como solução de problemas de estimativas. Portanto, configura-se como um método probabilístico, com dados espacialmente coordenados para o estudo dos valores amostrados, que permite estimar variáveis em locais não amostrados (FERNANDES, 2009).

De acordo com Yamamoto (2013), a geoestatística tem um papel fundamental no planejamento de lavra de curto, médio e longo prazos, pois, por meio de estimativas atualizadas das reservas minerais, pode auxiliar na tomada de decisões na operação da mina.

Entre os problemas operacionais que a Geoestatística pode resolver estão: definição da quantidade e localização de amostras vizinhas para estimativa de um bloco; reconhecimento e tratamento de amostras agrupadas por amostragens preferenciais ou detalhadas de zonas mais ricas em minério; tipo de mineralização em estudo (distribuição e variabilidade espaciais da variável de interesse); transformação de variáveis; geometria. (YAMAMOTO, 2013)

A geoestatística pode ser entendida como uma subárea da estatística, cujo as técnicas e métodos visam o estudo das variáveis regionalizadas, buscando entender a aleatoriedade dos dados, estruturação espacial e as funções de correlações destes (YAMAMOTO, 2013). Estas variáveis de acordo com Matheron, possuem as mesmas características qualitativas dos fenômenos que elas representam, como também apresentam características de localização, suporte, continuidade e anisotropia (Matheron, 1965, *apud* Fernandes, 2009).

2.6.1 Variografia

A geoestatística desempenha um papel fundamental na análise e estimativa de recursos minerais na mineração. Dentre as técnicas utilizadas nessa área, destaca-se a variografia, cujo objetivo é avaliar a variação espacial dos dados amostrais (YAMAMOTO, 2013).

Os variogramas são a base da variografia. Eles são utilizados para medir a variação espacial dos valores de um determinado atributo, como teores de minerais em uma jazida, por exemplo. O variograma é construído a partir da análise da distância e da diferença entre os valores de pares de amostras.

Através da análise dos variogramas, é possível definir os parâmetros necessários para a criação de modelos geológicos e de recursos minerais mais precisos e confiáveis. A variografia é uma ferramenta importante para a otimização dos processos de mineração, já que permite uma melhor compreensão das características do depósito mineral e, conseqüentemente, uma melhor estimativa dos recursos disponíveis. Além disso, a variografia é útil para a identificação de anomalias e para a definição de áreas de alta ou baixa mineralização (YAMAMOTO, 2013).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Material

3.1.1 Dados Geológicos

O banco de dados empregado para a delimitações geológicas no trabalho foram os dados obtidos pelo levantamento geológico do Estado da Bahia desenvolvido pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) (OLIVEIRA, 2016). Também foram utilizadas informações e dados presente em artigos sobre a geologia da área (ALMEIDA, 2017). O enfoque da caracterização geológica foi a porção do segmento Ipueira-Medrado da Unidade máfica-ultramáfica do Vale do Jacurici.

Dentro da área de estudo, são encontradas as seguintes litologias: sienito (Itiúba); granulito-gnássico (Unidade Fazenda São Bento), migmatitos, mármore, ortogneise da Unidade Santa Luz; Formação Ferrífera Bandada (BIF) da Unidade Pedra d'água; serpentinito, cromitito, metagabronorito, metadunito, metapiroxenito, metanorito e meta gabro do Complexo máfico-ultramáfico do Vale do Jacurici.

3.1.2 Sensoriamento Remoto

No trabalho, foram empregadas imagens óticas do sensor ASTER abordo do *Earth Observing System (EOS) TERRA* e a imagem de RADAR do satélite *Alos* sensor *Palsar*. A plataforma na qual está acoplado o sensor ASTER, viaja em uma órbita quase circular, síncrona com o Sol, com inclinação de 98,2° à uma altitude de 705Km com ciclos de obtenção de imagens há cada 16 dias. Este sensor (ASTER nível 1B) apresenta 14 bandas (Tabela 2). Para o estudo da área em questão foram usadas duas cenas: ASTB011005130520 e ASTB011005130529 obtidas no dia 05 de outubro de 2001. Ambas podem ser acessadas através do site do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS). A imagem de RADAR do sensor *Palsar* foi adquirida no site *Alaska Satellite Facility (ASF)* e possui resolução espacial de 12,5m.

Tabela 2 – Características do Sensor ASTER.

Canal	Bandas	Alcance das Bandas Espectrais (μm)	Resolução Espacial (m)	Largura da faixa (km)
Visible Nature Infrared (VNIR)	Banda 1	0.52-0.60	15	60
	Banda 2	0.63-0.69	15	60
	Banda 3N	0.76-0.86	15	60
	Banda 3B	0.76-0.86	15	60
Short Wavelength Infrared (SWIR)	Banda 4	1.6-1.7	30	60
	Banda 5	2.45-2.185	30	60
	Banda 6	2.185-2.225	30	60
	Banda 7	2235-2285	30	60
	Banda 8	2.2295-2.365	30	60
	Banda 9	2.36-2.43	30	60
Long Wavelength Infrared (TIR)	Banda 10	8.125-8.475	90	60
	Banda 11	8.475-8.825	90	60
	Banda 12	8.925-9.275	90	60
	Banda 13	10.95-10.95	90	60
	Banda 14	10.95-11.65	90	60

Fonte: Autor (2023)

3.1.3 Aerogeofísica

Os dados utilizados (.*grd*) foram cedidos pela Companhia Baiana de Pesquisa

Mineral (CBPM), referente ao projeto de levantamento aerogeofísico do setor Riacho Seco-Andorinha (código 3035). Para as linhas de voo, foram realizados transectos a cada 250m (leste-oeste) e linhas de controle a cada 2.500m (norte-sul). Com um sistema acoplado a aeronave com sensores de gamaespectrometria e magnetometria, foram coletadas amostras a cada 0.1 e 1.0 s (magnético e gamaespectrometria, respectivamente), com sensor de vapor de Cs e resolução de 0.001 nT (magnético) e 256 canais espectrais (gamaespectrometria) de acordo com os dados da LASA (2002). A aquisição dos dados foi realizada entre 29 de setembro de 2001 a 26 de dezembro de 2001 pela empresa LASA Engenharia e Prospecções S/A.

Os dados do aerolevanteamento estão dispostos na tabela abaixo.

Tabela 3 Dados de aerogeofísica (gamaespectrometria e magnetometria)

Banco de dados aerogeofísicos	
Número do Projeto	3025
Nome do Projeto	Riacho Seco – Andorinha
Metodologia	Magnetometria; Gamaespectrometria
Espaçamento das linhas de voo (m)	250
Espaçamento das linhas de controle (km)	7.5
Altura do voo (m)	100
Intervalo	0.1 s (mag); 1 s (gama)
Área levantada (km ²)	11030
Quilômetros lineares voados	48651.2
Data do projeto	2001 - 2002

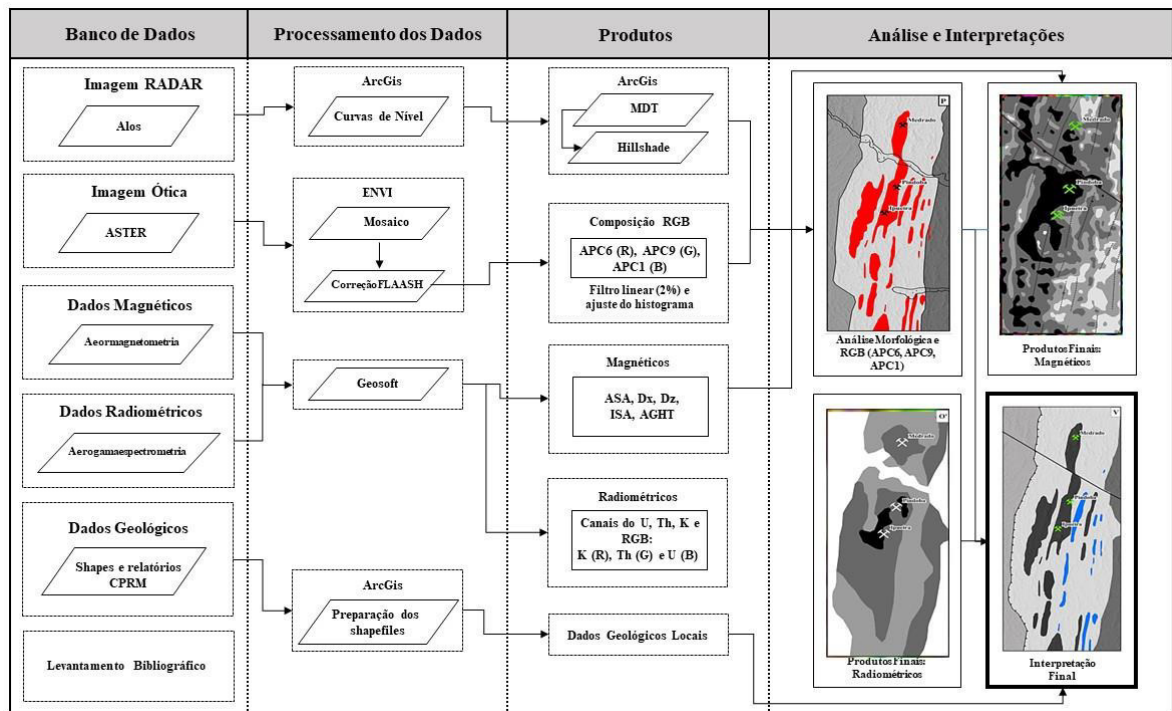
Fonte: CBPM (LASA, 2002)

3.2 Metodologia

3.2.1 Sensoriamento Remoto e Aerogeofísica

Os métodos utilizados no trabalho abrangem estudos de Sensoriamento Remoto e Aerogeofísica e estão descritos nos itens a seguir. A figura 8, apresenta o fluxograma das atividades empregadas nos tratamentos nos dados.

Figura 8 – Fluxograma de trabalho.



Fonte: autor (2023)

3.2.1.1 Processamento Digital de Imagem

A imagem de RADAR do sensor *Palsar* foi utilizada para a análise morfológica da área de estudo através de um Modelo Digital de Terreno (MDT). Para tal, foi implementada uma técnica para o realce das feições de drenagens, padrões de rugosidade e estruturas do terreno. O algoritmo *Hillshade* presente no *software* ArcGis 10.7.1[®] permite a implementação de uma luz artificial com ângulos delimitados para realçar essas feições. O foco da luz aplicada ao Modelo Digital de Terreno foi posicionado em um azimute de 110° com inclinação de 15° de ângulo de mergulho.

As imagens óticas utilizadas, originalmente foram obtidas em termos de radiância. Assim, foi necessário a correção radiométrica através do algoritmo *Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Hypercubes* (FLAASH) (Kaufman *et al.*, 1997) para as bandas do canal do VIR e SWIR. Esta correção utiliza os comprimentos de ondas da região do infravermelho e de ondas curtas (<3µm) para a correção das imagens dentro do espectro do visível. Pode ser usada para sensores hiperespectrais e multiespectrais (Kaufman *et al.*, 1997). As bandas termiais não foram empregadas ao estudo.

Em seguida, foi criado um mosaico das cenas no *software* ENVI[®] 5.3 para a realização dos processamentos das imagens. Dentre os processamentos, duas técnicas foram empregadas: Análise das Principais Componentes (APC) (CROASTA, 1992). Também foi

aplicado filtros lineares, ajustes de histogramas e composições de cores falsas RGB. No trabalho em questão, as técnicas de APC foi aplicada apenas para os dados VNIR e SWIR.

3.2.1.2 *Análise da Principal Componente (APC)*

A Análise das Principais Componentes (APC) é uma técnica na qual permite determinar a extensão da correlação entre as bandas, e através da transformação matemática apropriada, removê-la. Esta correlação, em outras palavras é configurada como redundância de informações entre as bandas, e são geradas quando há muitos alvos na cena, como por exemplo vegetação ou sombreamento topográfico. A APC, trabalha justamente na eliminação da alta correlação, segregando os ruídos em camadas diferentes com quantidade iguais aos dados de entrada (MENEZES, 2012).

Nos três primeiros componentes gerados são retidos 99% das informações espectrais das bandas. Nas demais APC de baixa ordem, está presente 1% das informações apresentam também baixas relações de sinal-ruído. Entretanto, para o realce das informações de alguns alvos, é interessante a combinação entre dados de alta e baixa ordem (Amer *et. al.*, 2010).

Através deste método, em resumo é possível verificar o nível de correlação entre as bandas e o grau de informação ou variância presentes nos dados (MENESES, 2012).

Este tratamento é apropriado para imagens de sensores com alto número de bandas espectrais (CROASTA, 1992). Os contrastes gerados através da compartimentação das informações neste processo permitem aumentar as diferenças espectrais e mapeamento das unidades litológicas (Liu *et al.*, 2014). Assim, é evidenciado feições que antes apresentavam discretas aos olhos.

3.2.1.3 *Tratamento dos Dados Aerogeofísicos*

Toda esta fase da pesquisa foi realizada no software *Oasis Montaj 9.10* da *Geosoft*[®] e dividiu-se em duas etapas. A primeira, foi compreendida pelos processamentos dos dados e a segunda, pela interpretação dos dados radiométricos e magnéticos com a informação geológica local (OLIVEIRA, 2016). A metodologia empregada é baseada por um compilado de processamentos de dados aerogamaespectrométricos e aeromagnetométricos (PEIXOTO, 2016; 8. Pilla Dias *et. al.*, 2021).

Dentre os produtos gerados e aplicados à pesquisa em questão, no domínio dos dados radiométricos, foram: urânio normalizado (eU), tório normalizado (eTh), potássio (K), e a composição ternária RGB (eU, eTh e K). Dentre os produtos magnéticos, foram trabalhados

com o *tilt* derivativo do campo magnético (*Tilt Derivate*) (Verduzco et al., 2004), Amplitude do Sinal Analítico (ASA) (LI, 2006), Amplitude do Gradiente Horizontal Total (AGHT) (Cooper & Cowan, 2008), 1ª Derivada do Campo Magnético Total e a 1ª Derivada Vertical (PEIXOTO, 2016).

3.2.1.4 Integração dos Produtos

A integração dos dados foi desenvolvida em ambiente SIG do ArcGis 10.7.1[®]. Os dados de entrada neste procedimento foram os produtos dos processos anteriores: raster dos produtos dos dados orbitais, dos domínios magnéticos e radiométricos. Para tal, os dados de entrada foram reclassificados para: baixa, média e alta (Tabela 4). Estas classes foram determinadas através da característica do dado e suas respostas para ocorrência das rochas máficas-ultramáficas. Para tal, as respostas deveriam estar configuradas como altos valores magnéticos e baixo radiométrico para os três canais dos radioelementos Th, K e U.

Tabela 4 – Reclassificação dos dados raster para composição do Mapa de Possibilidade da Ocorrência de Rochas Máficas-Ultramáficas.

	Produtos de Sensoriamento Remoto	Domínios Magnéticos	Domínios Radiométricos
Baixa	Sienito Itiúba	Baixo e Médio	1
Média	Unidade Santa Luz e São Bento	Alto	2
Alta	Unidade Vale Jacurici	Muito Alto	3 e 4

Fonte: Autor (2002)

Com as novas classes definidas, foi realizado uma Álgebra de Mapas através da sobreposição dos dados, afim da obtenção de um novo raster desenvolvido pela integração dos dados. Em seguida, através da Lógica *Fuzzy*, foram estabelecidas cinco classes para este raster em relação a possibilidade da ocorrência de rochas máficas-ultramáficas: “Muito Alta”, “Alta”, “Média”, “Baixa” e “Muito Baixa”.

Ao fim, foi empregada uma análise conjunta dos produtos aerogeofísicos e processamento de imagens com a geologia para extração de informações dos litotipos. A análise dos resultados foi balizada com os dados de geologia da CPRM na carta geológica Andorinhas (SC.24-Y-B-II) (OLIVEIRA, 2016) e os dados litológico-estrutural de Almeida (2017).

3.3 Modelagem Geológica e Análise Estatística Exploratória

A etapa de modelagem geológica foi realizada pela interpolação dos dados obtidos em testemunhos de furos de sondagem, utilizando métodos clássicos de modelagem tridimensional (Kavouras, 1995). Nesse processo, foram desenvolvidas estruturas básicas,

como pontos, *strings* (linhas) e *wireframes* (superfícies). Em seguida, foram criados sólidos para a montagem do modelo de blocos (Darling, 2011; Campos, 2017), que serviram de base para a extração de dados volumétricos em uma plataforma de modelagem 3D.

No trabalho em questão, foi utilizada a técnica de modelagem clássica, também conhecida como modelagem explícita, para a criação do modelo geológico 3D. A modelagem geológica 3D explícita é um método que emprega dados de diversas fontes para gerar uma representação digital tridimensional da estrutura geológica de uma determinada área. Essa técnica se baseia em informações obtidas a partir de furos de sondagem, amostras de rochas, mapas geológicos e outras fontes de dados geológicos, os quais são integrados e interpolados para criar uma visualização tridimensional da subsuperfície. Dessa forma, o método oferece alta precisão na obtenção de informações detalhadas sobre as características geológicas em pontos específicos, mas pode ser limitado pela densidade e distribuição dos furos de sondagem.

O conjunto de dados utilizado neste trabalho estão agrupados em um banco de dados cedidos pela empresa FERBASA, sendo composto por dados de furos de sondagens, modelo digital de terreno (MDT) e interpretações de seções geológicas. Portanto, este é composto por 316 furos de sondagens rotativas, dispostos em uma malha irregular na superfície, com um espaçamento médio de 30 metros entre as seções. Em relação à topografia local, a altitude média do terreno é de 360 metros. Verticalmente, a maioria dos furos de sondagens formam estruturas de leque, atingindo profundidades de até -38 metros em relação ao nível do mar. Os comprimentos dos furos também variam significativamente, variando de 0,5 a 252 metros de comprimento.

Entre os 316 furos de sondagens, há um total de 4.320 amostras distribuídas. Estas amostras foram agrupadas em 12 unidades, compostas por diferentes litologias, estruturas geológicas e unidades de interesse mineral. Destaca-se entre essas unidades: o diopsidito, gabro, granulito, mármore, metagrauvaca, microgabro, ortopiroxenito, pegmatito, serpentinito, região de falha, minério tipo disseminado e tipo *lump*.

Em função da distribuição do Cr_2O_3 nos furos de sondagens, o banco de dados apresenta três percentuais distintos: -1 para representar ausência do óxido em questão; 20% para minério do tipo disseminado; e 38% para minério tipo *Lump*. Assim, do total de amostras descritas, 89,21% representam amostras estéreis (3.854 amostras), 4,25% de minério tipo disseminado (184 amostras) e 6,52% para minério tipo *lump* (282 amostras).

Sequencialmente à análise estatística inicial, foi realizado uma triagem para observar a estrutura do banco de dados que seriam usados para composição do modelo. Nesta etapa, foram checados os separadores decimais, simbologias usadas nos identificadores e

coordenadas geográfica dos furos de sondagens. Em seguida, foram constituídas as tabelas de *Collars* (furos em superfície), *Survey* (mergulho, direção e azimute) e Litologia no editor de planilhas Exel da *Microsoft*[®]. Vale ressaltar, que as coordenadas de altitude (z) dos *Collars*, foram obtidas após a interpolação das curvas de nível e extração destas de um arquivo em formato .tif através de um Modelo Digital de Terreno (MDT) no ambiente SIG do *Arcgis*[®] 10.7.1.

Após o tratamento inicial dos dados de entrada, as tabelas foram importadas para a plataforma de modelagem Studio RM e convertidas em formato .dm (formato padrão do *Studio RM*). Dentro da plataforma, foram criados os *Drillholes* (furo de sondagem) e as *strings* (linhas) com amarrações nos limites do topo e da base de cada camada litológica. Também foram incorporados arquivos matriciais em formato .tif para composição da topografia. A princípio, esse dado era composto por dois arquivos matriciais, entretanto, com as ferramentas do Studio RM e através das operações booleanas, foi desenvolvido uma única topografia mediante os dois dados originais.

Com os limites das camadas claramente definidos através das *strings* criadas para cada seção, foi possível estruturar a montagem dos sólidos geométricos. Utilizando esses sólidos e incorporando a topografia, iniciou-se a etapa de blocagem. Nesta fase, foi criado um modelo de blocos usando um grid como base. Optou-se por criar um modelo com células de 12,5 metros em cada eixo (x, y e z), que corresponde a 1/4 da distância entre as seções geológicas. O protótipo resultante contém 63.597 blocos, com uma rotação de 2° no eixo z. O algoritmo do programa utilizado na pesquisa para modelagem 3D, trabalha com sub-blocos para fins de diminuir o erro associado aos processos de cubagem. Usando o protótipo e os sólidos geométricos, foram criados modelos de blocos geológicos para a porção norte e centro-sul da mina de Medrado.

4 RESULTADOS

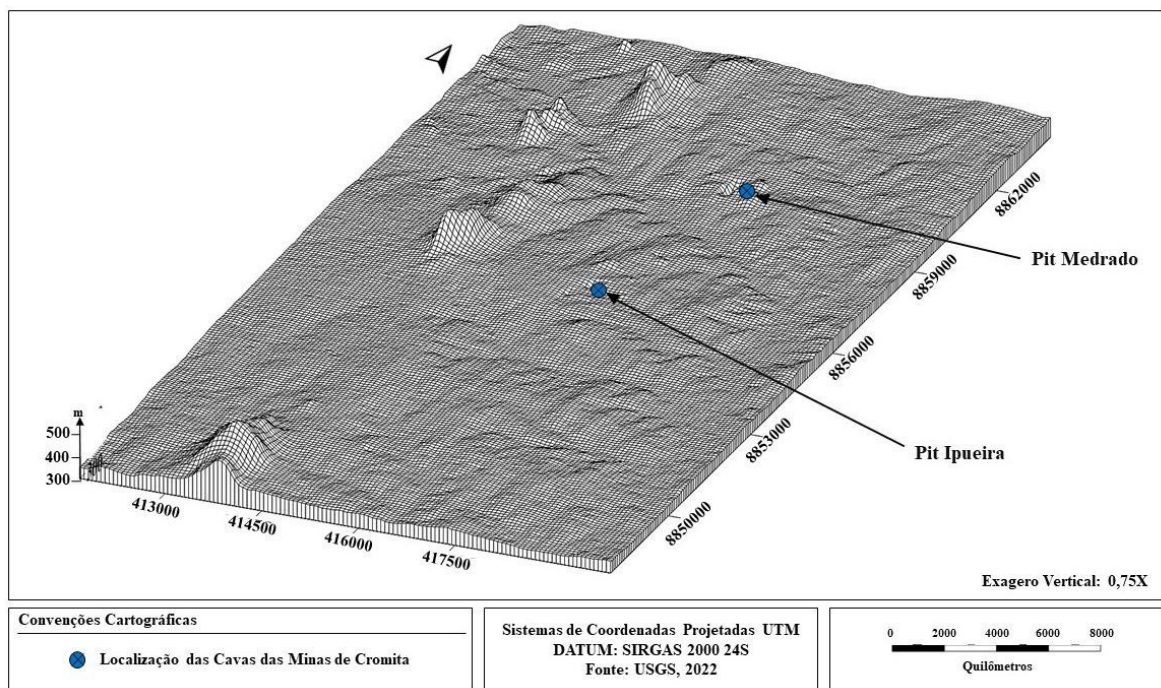
4.1 Sensoriamento Remoto e Aerogeofísica

Os resultados obtidos foram subdivididos em dois principais nichos. O primeiro compreendendo os resultados das imagens de radar e ótica, respectivamente do sensor *Palsar* e *Aster*. O segundo nicho, correspondendo aos resultados aerogeofísicos (dados magnéticos e radiométricos). Para a integração dos produtos e análise dos resultados com foco nas rochas máficas-ultramáficas, foi empregado a técnica de Álgebra de Mapas e Lógica *Fuzzy*. Os resultados serão apresentados a seguir.

4.1.2 Análise Morfológica (Radar)

Com a finalidade da análise da morfologia topográfica, foi elaborado um Modelo Digital de Terreno baseado em estruturas de *wireframes* com exagero vertical de 0,75 vezes conforme a figura 9. Através deste modelo, notam-se três feições com diferentes padrões de relevo no terreno. A porção oeste do modelo, apresenta um padrão menos rugoso, com maiores acidentes no terreno. No segmento centro-leste do modelo, podem ser visualizadas duas feições: feições rugosas com lineamentos preferenciais (centro); feições menos rugosas com lineamentos difusos e maior nível topográfico que a porção central (leste).

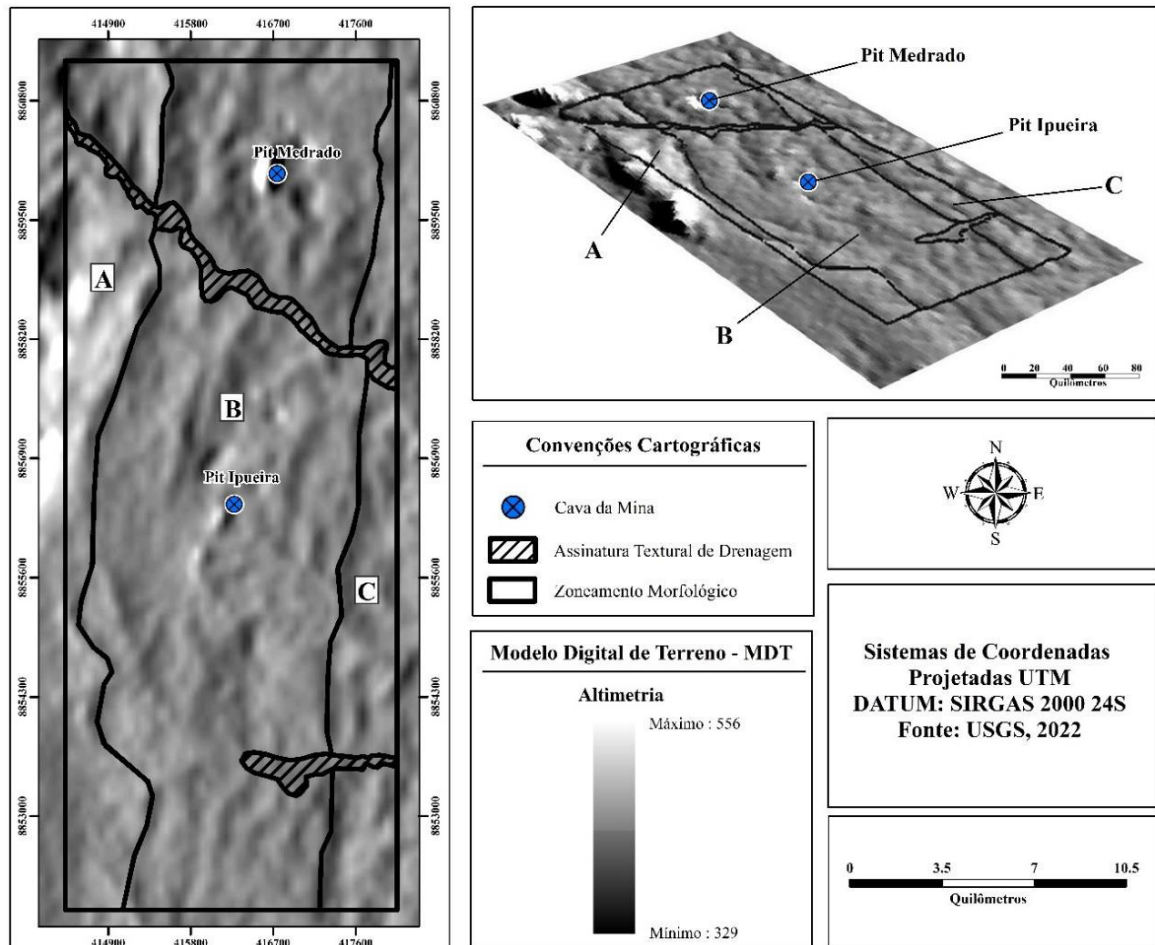
Figura 9 – Modelo Digital de Terreno baseado em estruturas de *wireframes*.



Fonte: autor (2023)

O MDT obtido através do processamento da imagem de radar local, após a implementação da técnica de luz artificial, foi adotado como base para extração das informações das feições estruturais local. De acordo com a figura 10, é possível o zoneamento da área de estudo em três grandes unidades.

Figura 10 – Delimitação de zonas de assinaturas texturais do terreno extraído através da imagem de Radar do satélite Alos sensor Palsar com luz artificial no azimute de 110° e 15° de incidência.



Fonte: autor (2023)

Através dos padrões texturais observados, foram interpretadas como unidades litológicas “A”, “B” e “C”. A unidade “A” apresenta uma assinatura textual marcada por uma porção com altos topográficos. A parte mais ao sul da unidade “A” é plana, pouco rugosa e sem presença de controles estruturais aparentes. Já a unidade “B”, apresenta um padrão diferente da supracitada, onde o terreno é mais rugoso, com presença de controles estruturais bem marcados e orientados no sentido N-S. A unidade “C”, igualmente a “B”, também apresenta controles estruturais aparentes, porém menos expressivo e com orientação difusa em comparação com as demais. Na figura 10, também podem ser observados alguns padrões de drenagens.

4.2.2 Análise das Principais Componentes (Imagens Óticas)

A APC foi aplicada para todas as nove bandas do sensor Aster (VIR-SWIR). Ao analisar as matrizes estatísticas geradas de correlação e covariância, foi percebido que há alto grau de correlação entre as bandas de forma positiva. Entretanto, para a covariância os valores apresentam-se próximos a zero, o que destaca uma independência entre elas. A primeira

componente (APC1) representa 97,72% da variância dos dados (Tabela 5). Entre as três primeiras principais componentes de maior ordem (APC1 à APC3), estão retidos 99,52% das informações das bandas.

Tabela 5 – Dados estatísticos da Análise das Principais Componentes (APC)

APC	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão	Variância (%)
APC1	0	0.46	0.08	0.07	97.72
APC2	0	0.55	0.11	0.09	1.14
APC3	0	0.70	0.17	0.14	0.66
APC4	0	1.00	0.26	0.22	0.24
APC5	0	0.88	0.19	0.16	0.09
APC6	0	0.84	0.19	0.16	0.05
APC7	0	0.94	0.19	0.17	0.04
APC8	0	0.82	0.16	0.14	0.03
APC 9	0	0.91	0.16	0.13	0.03

Fonte: Autor (2023)

Devido a transformações lineares realizadas pelo processamento, foram gerados os autovetores. Através de uma matriz composta pelos autovetores (Tabela 6) juntamente com o conhecimento da resposta espectral da cromita dentro das faixas do sensor trabalhado, foram escolhidos para composição RGB falsa cor das principais componentes: APC6 (*red*), APC9 (*green*) e APC 1 (*blue*). A escolha dessas componentes principais foi balizada mediante as maiores contribuições das bandas para as composições das APC.

Tabela 6 – Contribuição das Bandas para criação das APC

Auto-vetores	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9
APC1	-0.33	-0.33	-0.33	-0.34	-0.34	-0.34	-0.33	-0.33	-0.34
APC2	0.54	0.46	0.37	-0.21	-0.14	-0.07	-0.35	-0.31	-0.28
APC3	-0.26	-0.45	0.79	0.22	0.04	0.01	-0.12	-0.20	-0.01
APC4	0.10	-0.03	0.28	-0.23	-0.48	-0.53	0.47	0.34	0.09
APC5	-0.18	0.00	0.15	-0.55	0.08	0.51	0.40	0.05	-0.46
APC6	-0.08	0.19	-0.08	0.55	0.06	-0.24	0.44	-0.27	-0.57
APC7	-0.69	0.64	0.15	0.04	-0.18	0.00	-0.19	0.15	0.08
APC8	0.03	0.01	-0.07	0.16	-0.64	0.44	0.23	-0.46	0.30
APC9	0.13	-0.16	-0.03	0.33	-0.42	0.29	-0.30	0.57	-0.41

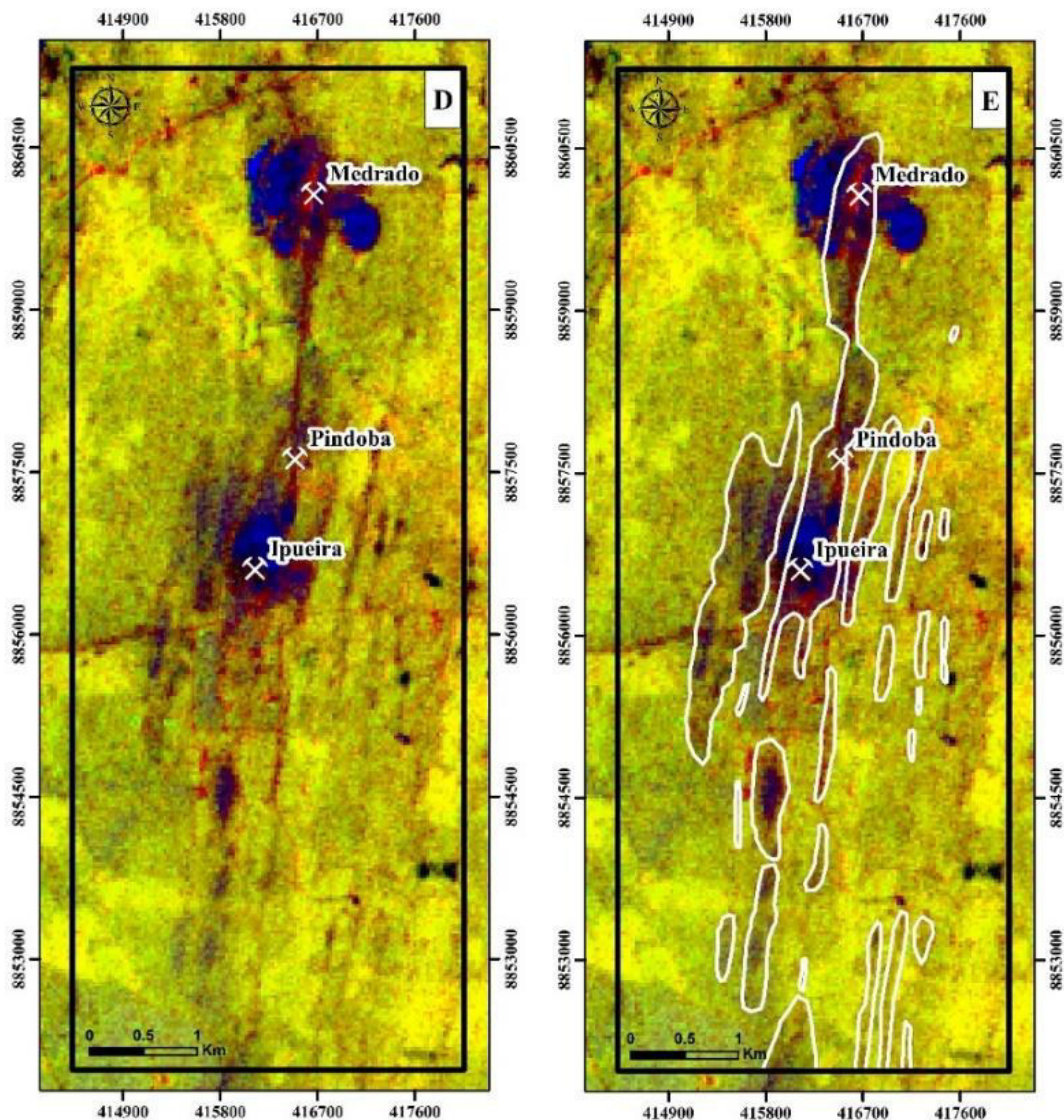
Fonte: Autor (2023)

Utilizando as APC selecionadas, foi gerado um produto de RGB com cores falsas para análise litológica. Este produto, pode ser visualizado através da Figura 11, e suas interpretações foram focadas à porção central da área de estudo. Através dos resultados obtidos, foram vetorizadas na porção central da área em estudo, zonas alinhadas no sentido majoritariamente

N-S. Estas zonas estão apresentadas na coloração em tons de castanho avermelhado (Figura 11.D, Figura 11.E), e de acordo com a bibliografia (MARINHO, 1986; ALMEIDA, 2017) estão correlacionadas aos corpos intrusivos máficos-ultramáficos do Complexo Vale do Jacurici. As porções nas tonalidades de azul escuro fazem o delineamento ao que concerne respostas espectrais das pilhas de materiais de rejeito e/ou de pátios das minas de cromo. As cores apresentadas na figura 11 são todas falsas cores para diferenciar as informações dos resultados obtidos.

Com este método, pouco se teve realce dos litotipos encaixantes e controle estrutural da área, inviabilizando assim o delineamento do sienogranito, granulito e para o ortogranulito que estão descritos em literatura. Assim, os resultados do RGB das APC foram aplicados apenas para o realce dos corpos do Complexo do Vale do Jacurici.

Figura 11 – Na imagem “D” é apresentado o RGB de cores falsas das APC. Já a figura “E”, está apresentando a figura com interpretação das zonas alinhadas N-S em linhas contínuas brancas.



Fonte: autor (2023)

4.3 Resultados Magnéticos

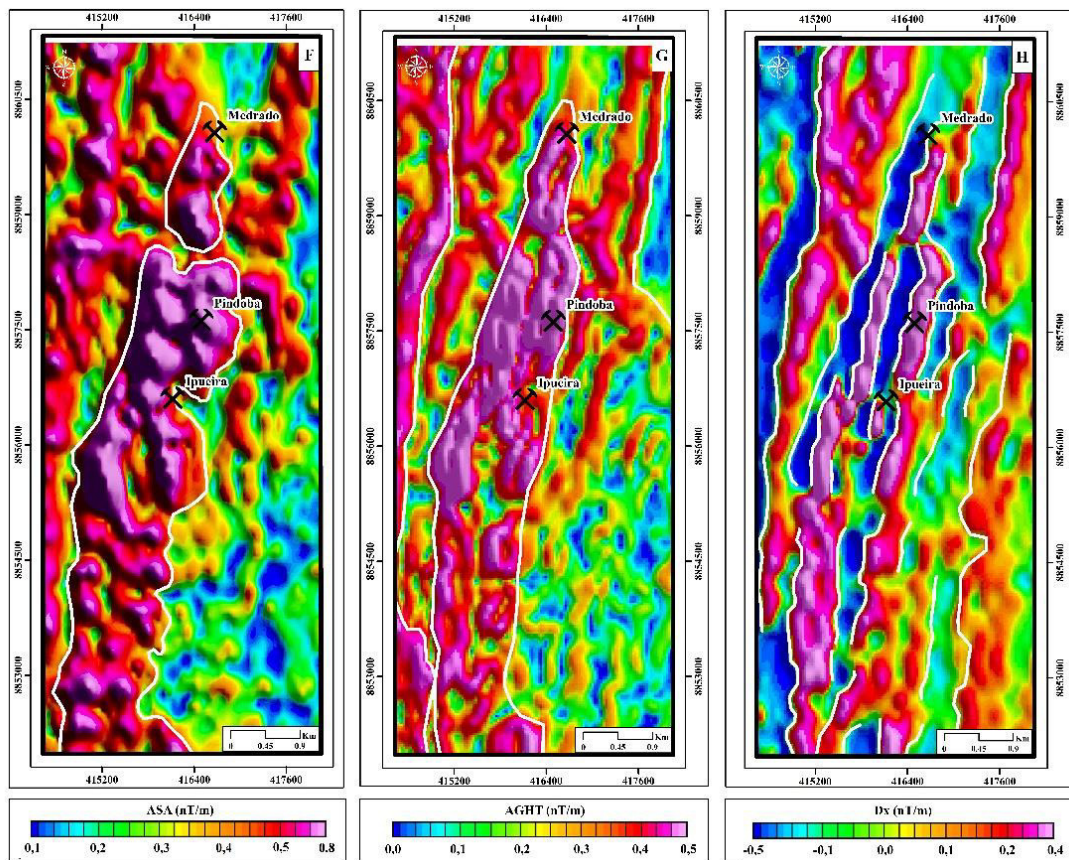
Diante dos resultados do processamento dos dados magnéticos, foram extraídos os limites de bordas e centros anômalos de alguns corpos geológicos. Em análise conjunta, através do produto ASA e da primeira derivada do campo magnético foi permitido a extração dos limites e foi realizado o zoneamento dos corpos anômalos como visualizado na figura 6.

O resultado do produto ASA (Figura 12.F), não apresentou delimitações nítidas na porção inferior da área. Entretanto, é visualizado valores mais elevados na ordem de 0,8 nT/m na porção mais central e alinhados no sentido N-S. Os valores mais baixos deste produto ($<0,3\text{nT/m}$) são difusos.

O filtro AGHT (Figura 12.G) funciona como complemento para análise do ASA, pois as respostas são semelhantes. Entretanto, no AGHT o realce da borda do corpo anômalo à nordeste da área através dos contrastes magnéticos entre 0 e 0,2nT/m é mais visível. Os limites do corpo anômalo (contraste entre 0,2 e 0,5nT/m) na porção oeste também foram realçados. Na porção mais central da área, são visualizados altos valores anômalos magnéticos, na ordem entre 0,3 à 5nT/m.

Através da primeira derivada no eixo x, os limites dos litotipos ficaram bem visíveis entre contrastes de altos ($>0,4\text{nT/m}$) e baixos ($>-0,1\text{nT/m}$) valores magnéticos (Figura 12.H). Ao longo de toda porção esquerda da área, é observado um contraste bem nítido entre os picos magnéticos. Na porção central, este contraste novamente é visualizado semelhante ao anterior, formando uma zona anômala magnética não contínua, com contrastes bem marcados entre valores máximos e mínimos (-0,5 e 0,4nT/m respectivamente). À leste, concentrado da porção superior a inferior da área em análise, são visualizados dois padrões de limites. O primeiro contraste é observado na porção mais ao norte entre -0,5nT/m e 0,4nT/m, e o segundo, de menor contraste na porção ao sul entre -1,0 e 0,2nT/m.

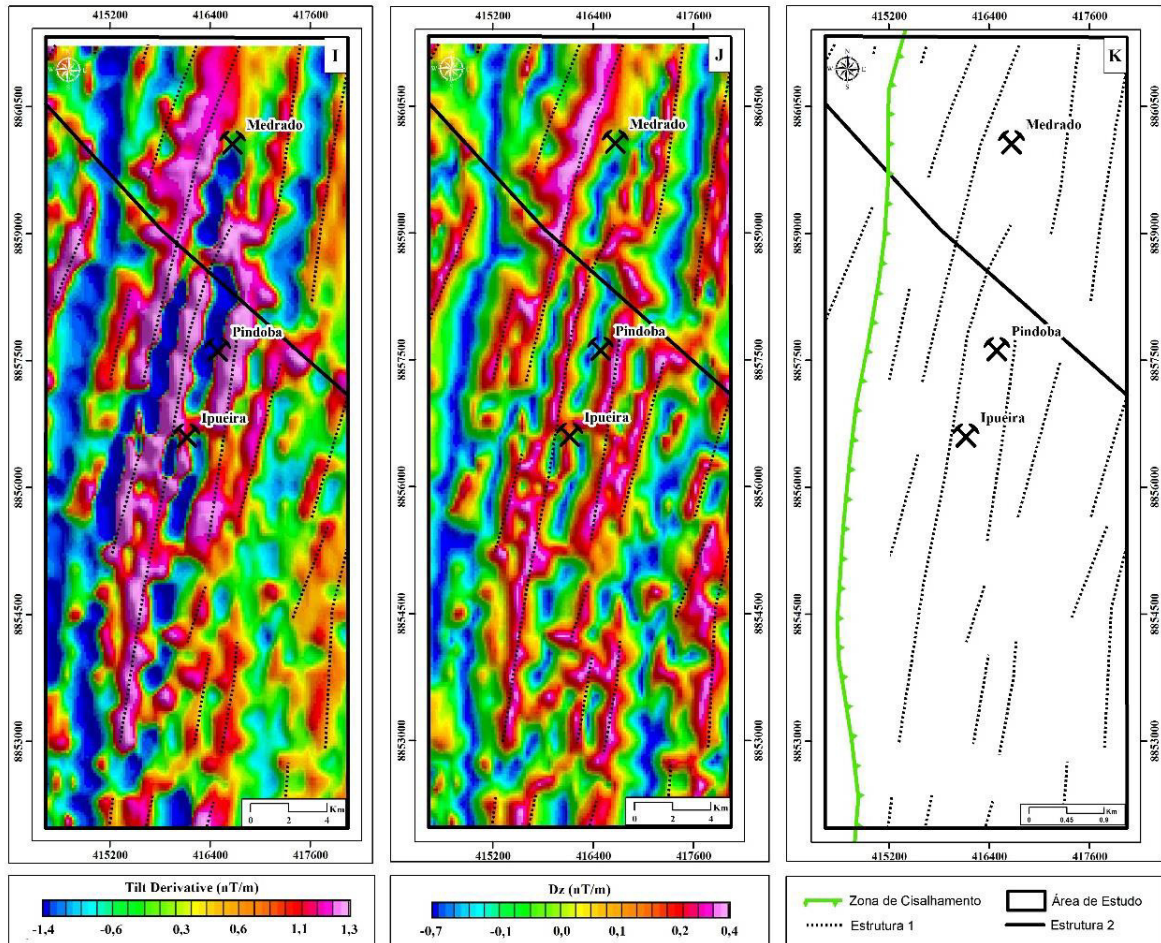
Figura 12 – (F) Produto ASA, com corpo anômalo central delineado em linha cor branca; (G) produto AGHT realçando o corpo central e alguns limites de bordas à oeste e nordeste da área de estudo; (H) produto da primeira derivada horizontal no eixo x realçando bordas



Fonte: autor (2023)

Também foram obtidos resultados para outros dois filtros, com a finalidade da identificação das bordas e corpos anômalos: a primeira derivada vertical e o *Tilt Derivative* (Figura 13.I). A primeira derivada vertical no eixo z (Figura 13.J), traz um bom contraste nas porções centrais, apresentando os maiores contrastes entre $-0,7$ e $0,4$ nT/m. Este produto, realça também limites que foram melhor representados pela primeira derivada horizontal e ASA. Entretanto, a primeira derivada vertical permitiu a extração dos lineamentos magnéticos. Estes lineamentos ficaram bem marcados nos produtos da primeira derivada vertical (Dz) e principalmente através do *Tilt Derivative*, orientados no sentido *NNE-SSW*. Ambos os produtos, apresentaram fontes anômalas alinhadas N-S, e uma estrutura maior perpendicular, no sentido NW-SE na porção ao norte da área. Na figura 13.K, estão representados os dados dos lineamentos obtidos em cores pretas, e em cor verde, por uma zona de cisalhamento já mapeadas pela CPRM.

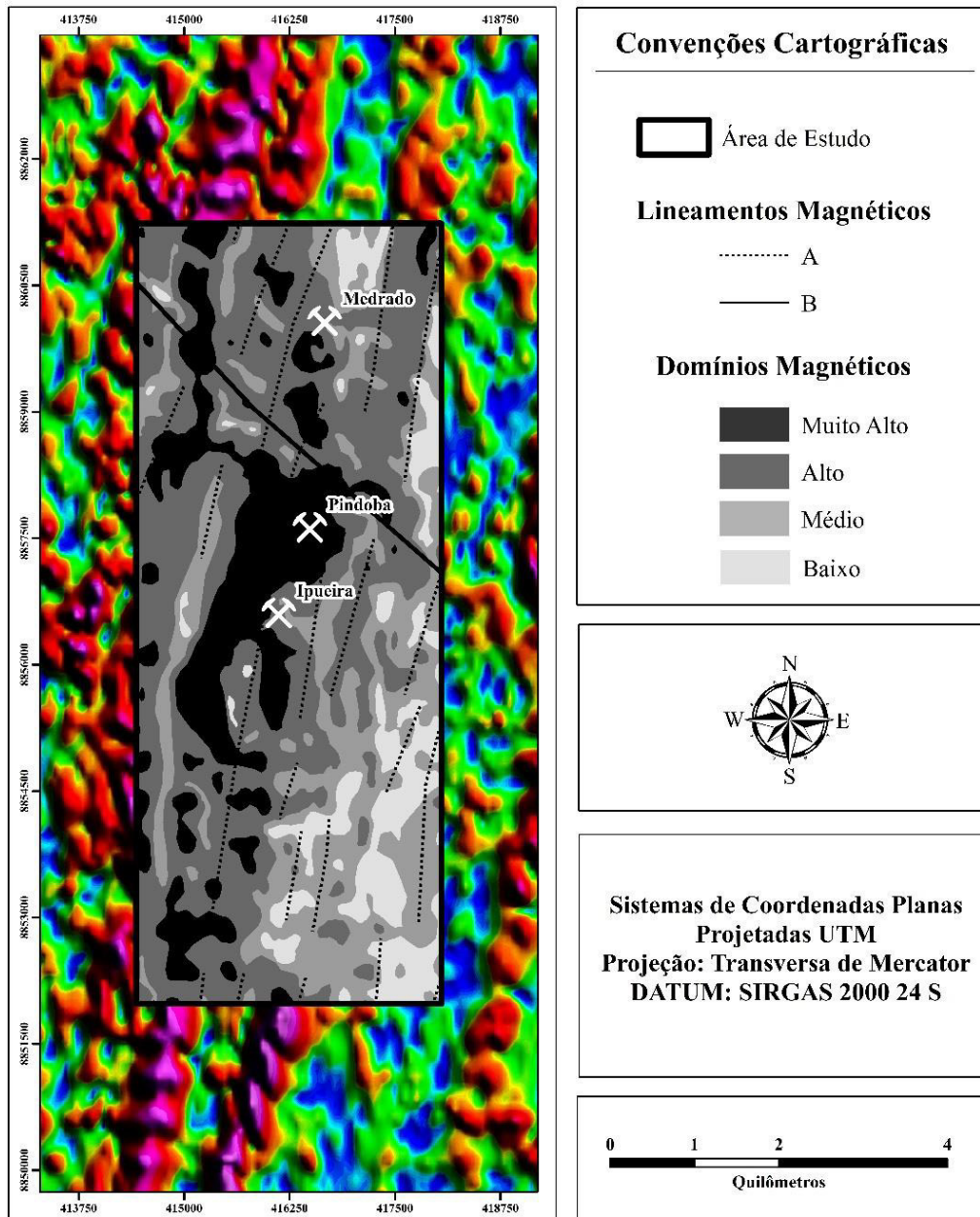
Figura 13 – (I) Produto *Tilt Derivative*, (J) Primeira derivada vertical realçando os lineamentos magnéticos, (K) Lineamentos Magnéticos e estruturas mapeadas pela CPRM. Todos os produtos apresentam sombreamento a 45°.



Fonte: autor (2023)

Para análise geral, foi criado um mapa final cruzando as informações dos domínios magnéticos identificados com os lineamentos magnéticos (Figura 14). Neste mapa, foram abordados a classificação dos domínios magnéticos em três classes: baixa (<0,1 nT/m), médio (0,2 a 0,3 nT/m) e alto (>0,3 nT/m) magnetismo.

Figura 14 – Domínios Magnéticos com a utilização da Amplitude do Sinal Analítico com Lineamentos Magnéticos extraídos da primeira derivada vertical e *Tilt Derivative*.



Fonte: autor (2023)

4.4 Resultados Radiométricos

Foram gerados oito produtos radiométricos: (1) eTh, (2) eU, (3) K, (4) RGB (K, eTh e eU). Para os canais eTh, eU e K foram criadas as seguintes classes: “alto”, “médio” e “baixo” teor (Tabela 7) por meio da análise dos histogramas.

Tabela 7 – Classes radiométricas

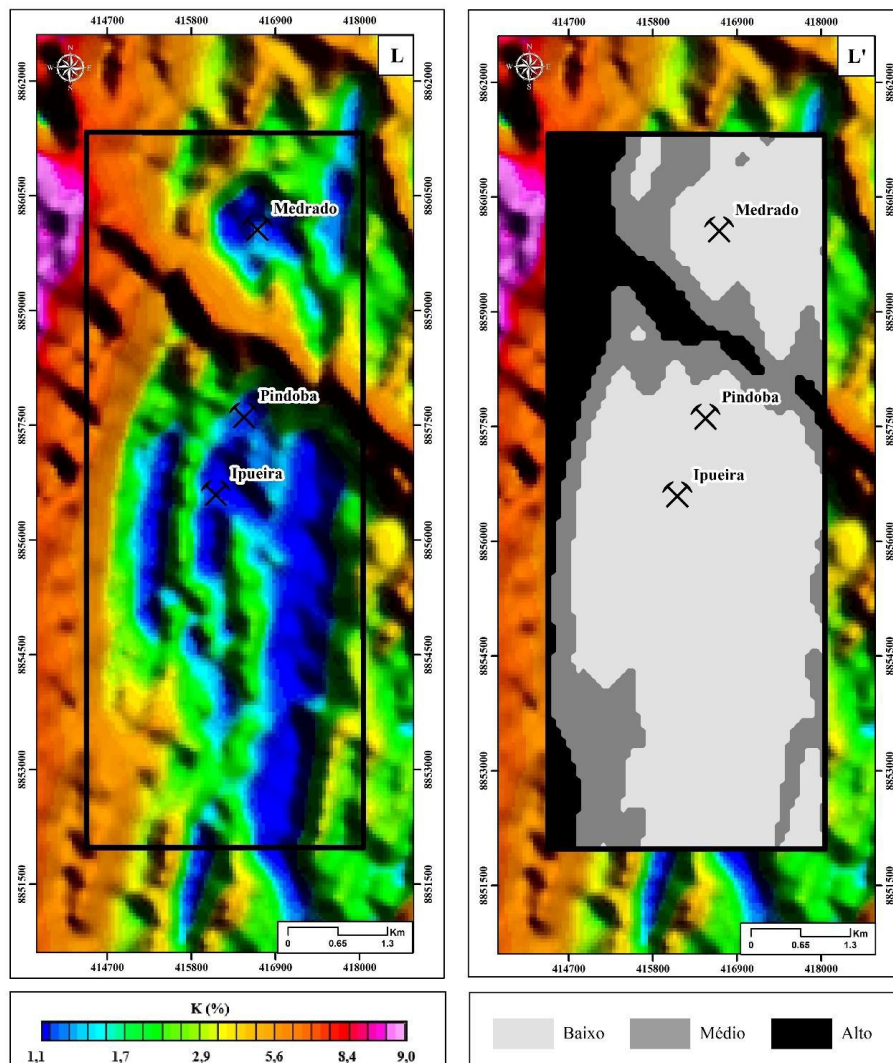
	K (%)	eTh (ppm)	eU (ppm)
Baixo	<2.38	<7.91	<0.31
Médio	2.38 a 4.12	7.91 a 10.91	0.31 a

			0.63
Alto	>4.12	>10.91	>0.63

Fonte: Autor (2023)

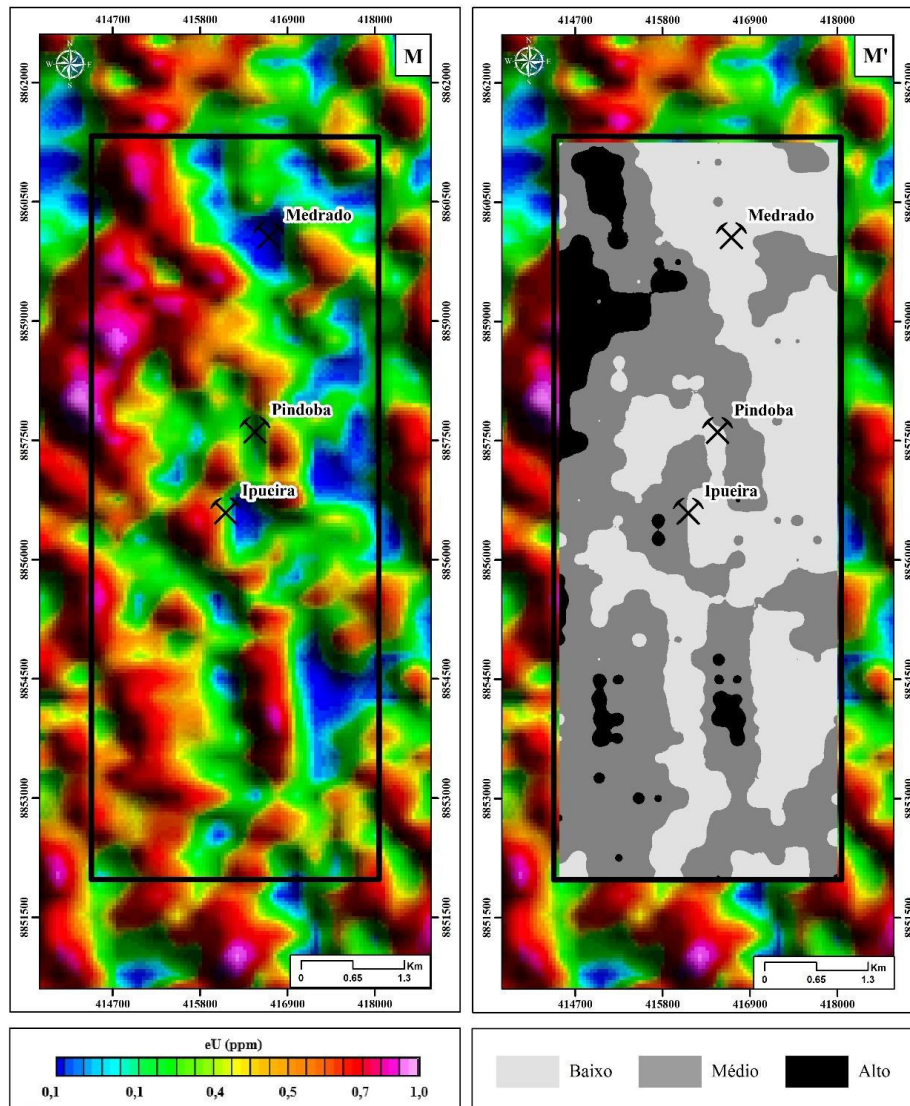
Através dos resultados dos dados radiométricos, foram obtidas respostas para os canais do K, eU e eTh. Na figura 15, são visualizadas anomalias de potássio (>5,6%) em toda a borda oeste da área de estudo. Também pode ser visualizada uma anomalia potássica cruzando a área na diagonal na porção mais ao norte. Entretanto, no restante da área, são notadas concentrações em ordens medianas e baixas em termos de radiâncias <1,7%. As principais anomalias (>0.63ppm) estão concentradas na borda oeste da porção superior da área de estudo, e outra menores ao sul e centro-sul. Já nos dados dos canais de eU, é visualizado uma anomalia positiva em toda a borda oeste e mais ao sul da área de estudo (Figura 16).

Figura 15 – Canal do K com a área de estudo ao centro. (L') Interpretação das respostas radiométricas do canal do K, classificado em baixo, médio e alto. Todos os produtos apresentam sombreamento a 45°.



Fonte: autor (2023)

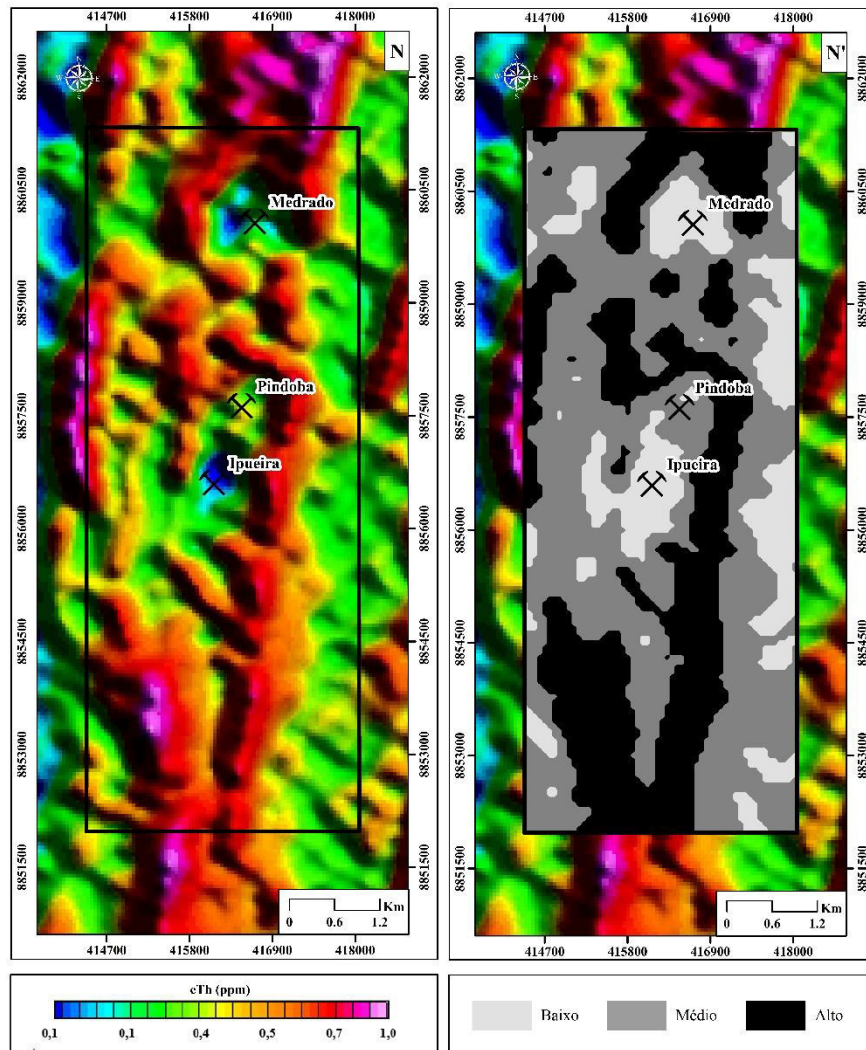
Figura 16 – (M) Canal do U com a área de estudo ao centro. (M') Interpretação das respostas radiométricas do canal do U, classificado em baixo, médio e alto. Todos os produtos apresentam sombreamento a 45°.



Fonte: autor (2023)

Na figura 17.N, é observada a distribuição do tório em direções alinhadas com os sentidos descritos em bibliografia (N-S). Os valores maiores que 0,6ppm, são encontrados em quase toda a área. Entretanto, é notado uma baixa radiância em toda a borda leste, e em alguns pontos ao centro do mapa (<6,1ppm). Nos canais do eTh e K, é observada uma estrutura bem marcada na diagonal na porção norte da área. Nesta estrutura, são observadas anomalias em valores altos para potássio e tório, e uma anomalia em menor proporção para urânio.

Figura 17 – (N) Canal do Th com a área de estudo ao centro. (N') Interpretação das respostas radiométricas do canal do Th, classificado em baixo, médio e alto. Todos os produtos apresentam sombreamento a 45°.

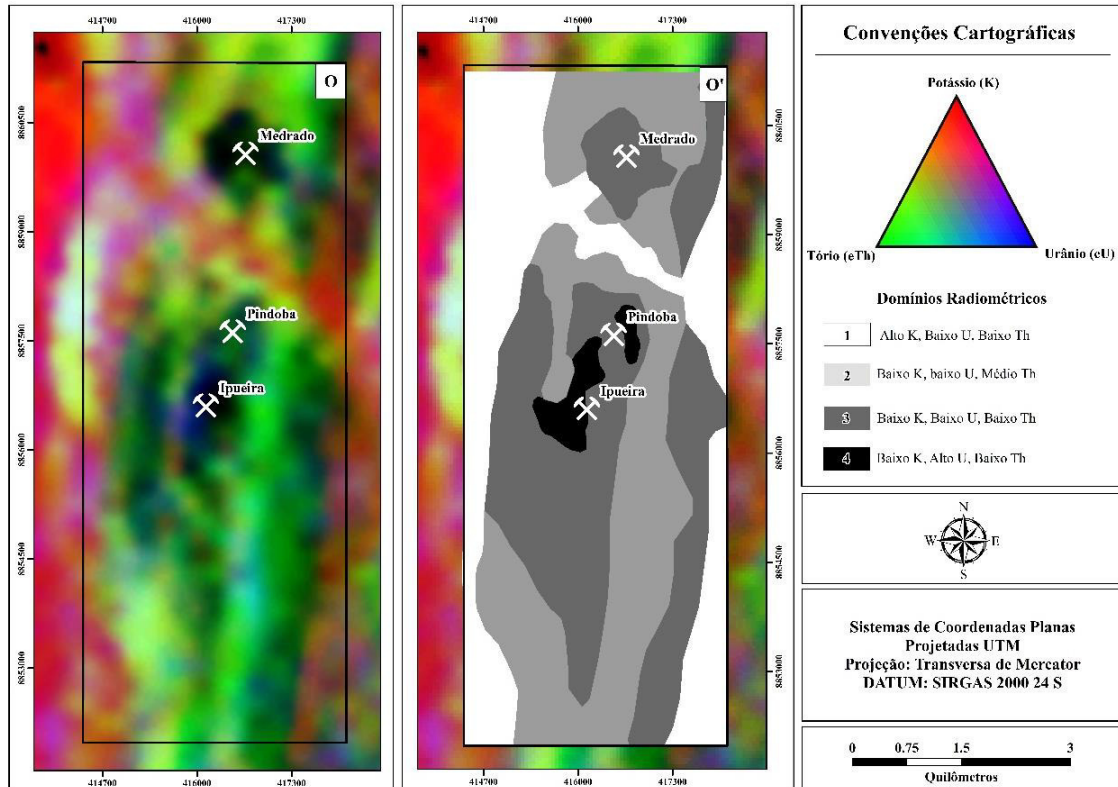


Fonte: autor (2023)

Através das interpretações dos três canais (K, U e Th) e subdivisões em classes alto, médio e baixo, foi gerado um mapa final cruzando estas informações de classificações. No mapa gerado através da técnica de álgebra de mapas, gerou zonas com níveis de significância variados para cada radioelemento.

O mapa ternário permite o zoneamento de anomalias de dois ou dos três radioelementos. Os realces são observados uma vez que a composição RGB evidencia partes com alta contagem de elementos, com as máximas concentrações dos três canais na cor branca, e as mínimas pela cor preta. Na composição de cores falsas ternária RGB, foram atribuídos os seguintes elementos para cada canal, respectivamente: R (K), G (Th) e B (U). Através do ternário, foi realizada a compartimentação da área em domínios gamaespectrométricos: “1”, “2”, “3” e “4” (Figura 18).

Figura 18 – (O) Composição Ternária RGB. (O') Interpretações dos Domínios Radiométricos (Red: potássio; Green: tório; Blue: urânio)



Fonte: autor (2023)

O primeiro domínio estabelecido “1” apresenta valores muito altos para o radioelemento K e baixo para U e Th. Nitidamente, esse domínio é marcado para cores vermelhas do canal, o que evidencia a grande quantidade de K. Atrélado a este domínio, é observado uma estrutura SE-NW cruzando a área na porção norte. O domínio “2”, apresenta elevados teores de Th, moderado teores de U e baixos em K.

O domínio radiométrico “3” apresenta cores mais escuras, o que pode estar associado com baixas concentrações dos três radioelementos. Este domínio, devido sua coloração na composição RGB, também pode estar associado a rochas máficas-ultramáficas e mármore. Na porção central deste domínio, é visualizado uma pequena anomalia de U, e foi denominado de domínio “4”.

4.5 Integração dos Dados

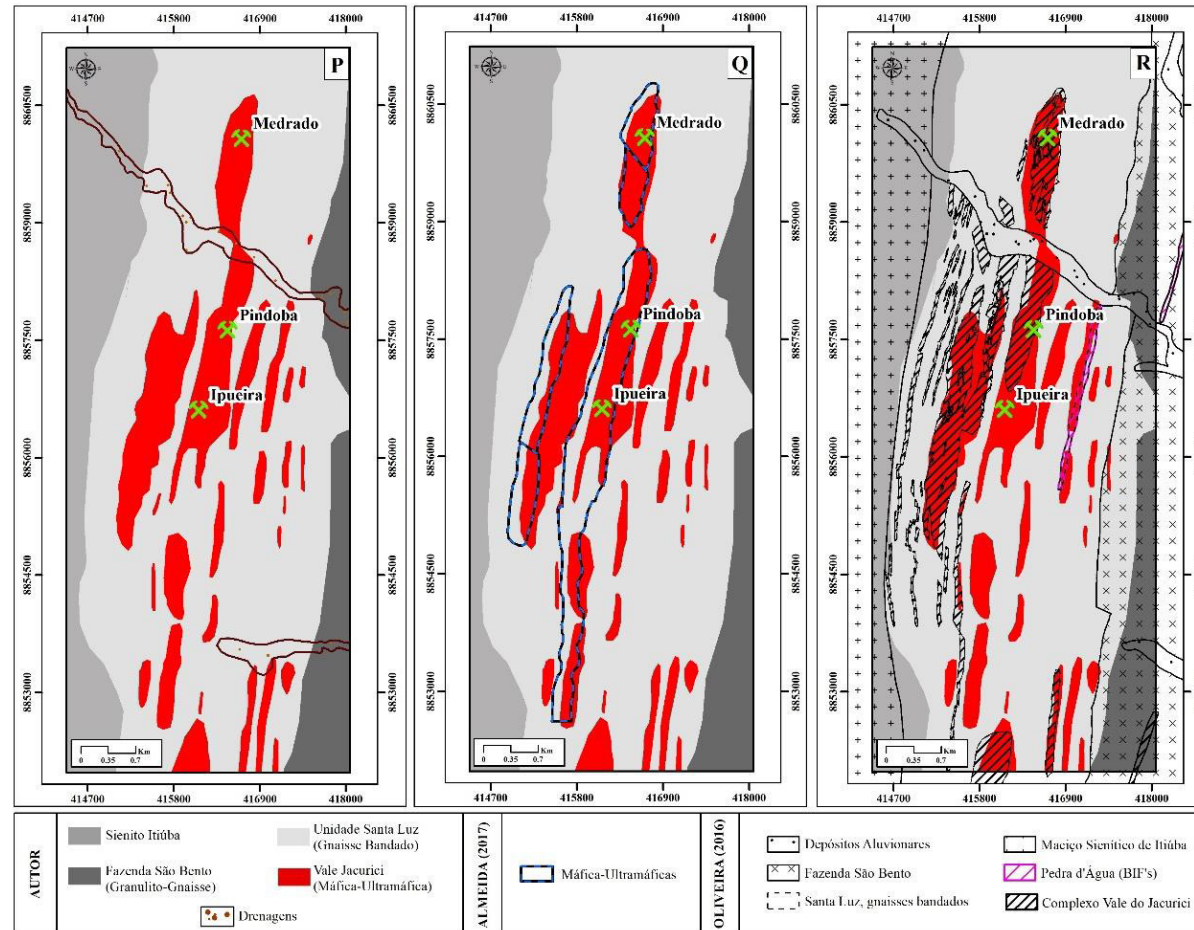
Mediante os resultados obtidos através das imagens de radar (unidades litológicas “A”, “B” e “C”) e das unidades alinhadas no sentido N-S realçadas com a imagem ótica, foi criado um mapa de sobreposição, como visualizado na figura 19. Neste mapa, foi realizada uma comparação com o mapeamento local feito a partir do banco de dados da CPRM (OLIVEIRA,

2016) (Figura 19.R) e com o mapeamento geológico e estrutural desenvolvido por Almeida (2017) (Figura 19.Q). Assim, é visualizada uma associação das litologias mapeadas com os resultados obtidos. Essa associação pode ser melhor observada entre a Unidade São Bento, Sienito Itiúba e Santa Luz, e os materiais do quaternário (depósitos aluvionares).

Em relação às rochas máficas-ultramáficas, apenas alguns alvos apresentaram uma boa representação dos resultados. Dentre estes alvos, estão os litotipos adjacentes as áreas de minas (Medrado, Ipueira e Pindoba), o litotipo descrito por Formação Ferrífera Bandada (BIF) (OLIVEIRA, 2016), e dois corpos localizados ao sul da área de estudo. Em bibliografia, os granulitos máficos apresentam respostas semelhantes às máficas-ultramáficas, o que pode acabar mascarando as respostas e dificultar a segregação dos diferentes litotipos. Vale ressaltar, que a escala de trabalho da CPRM e o empregado neste estudo são diferentes, o que leva apenas a uma comparação dos resultados (Figura 19).

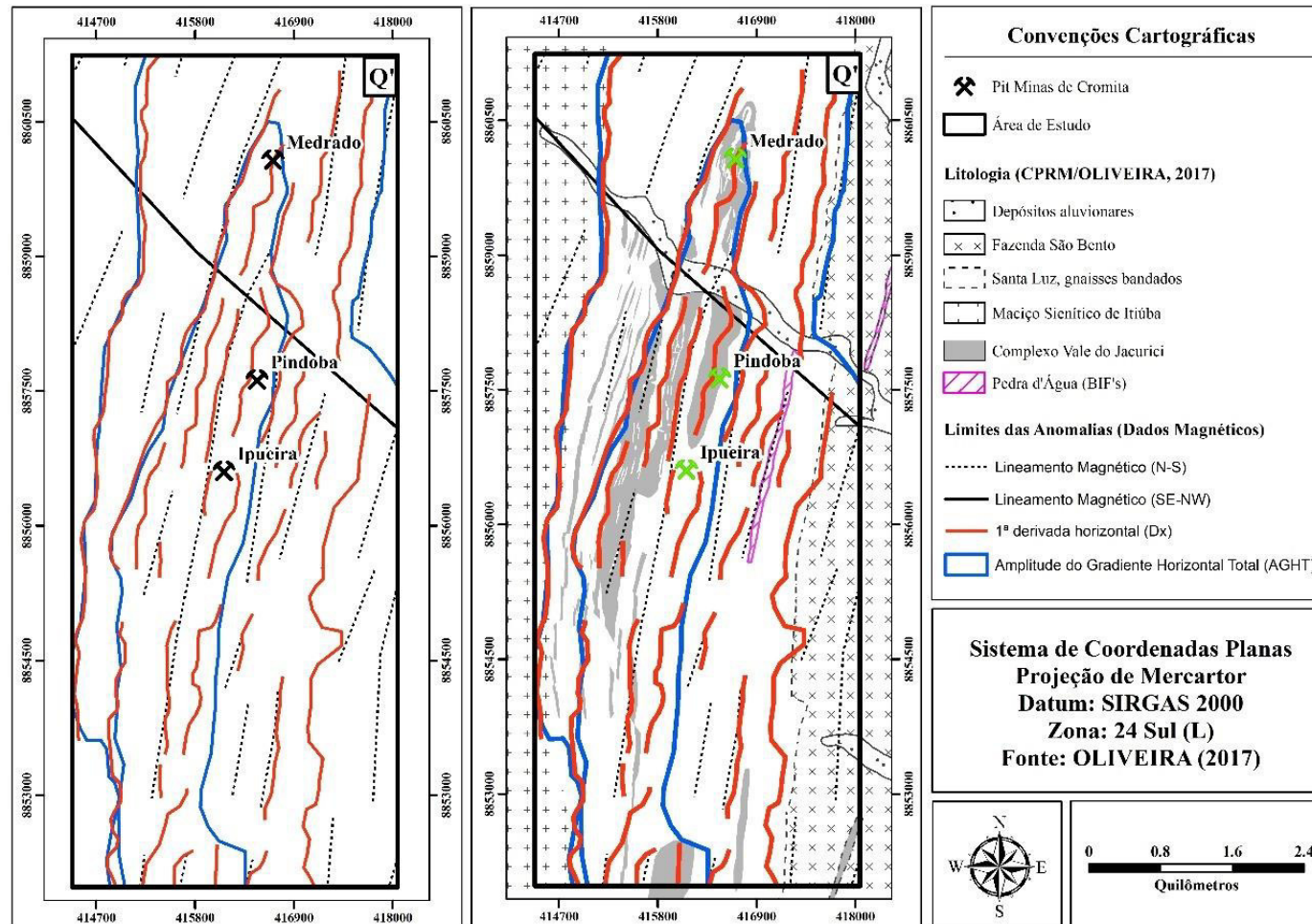
Com as informações extraídas dos processamentos dos dados magnéticos, foi elaborado um mapa para visualização dos resultados e comparação com a geologia em escala regional (OLIVEIRA, 2016) (Figura 20). Estas estruturas, estão associadas a limites de corpos geológicos e controles estruturais.

Figura 19 – (P) Resultados dos processamentos digitais das imagens de radar e ótica extração das informações em escala de 1:50.000. (Q) Sobreposição para comparação dos resultados obtidos com mapeamento geológico e estrutural (ALMEIDA, 2017) (1:50.000). (R) Sobreposição para comparação dos resultados obtidos com mapeamento geológico da CPRM (1:100.000) (OLIVEIRA, 2016)



Fonte: autor (2023)

Figura 20 – (Q) Bordas das anomalias magnéticas. (Q') Sobreposição para comparação dos resultados obtidos (1:50.000) com mapeamento geológico da CPRM (1:100.000) (OLIVEIRA, 2016)



Fonte: autor (2023)

4.6 Lógica *Fuzzy*: Interpretação das Rochas Máficas-Ultramáficas

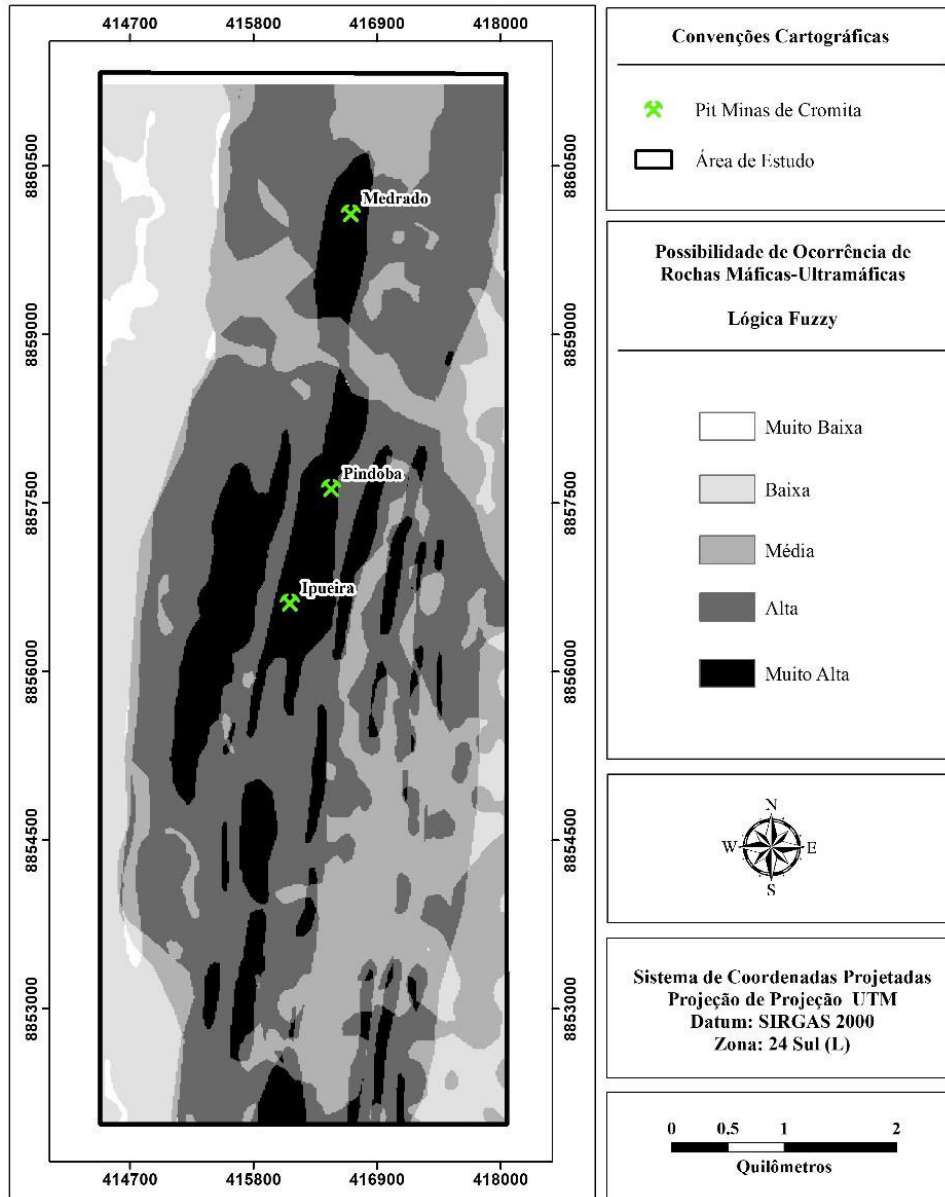
Dentre as abordagens inerentes a lógica, está a lógica *Fuzzy*, a qual lida com a incerteza e imprecisão, permitindo que variáveis e proposições tenham valores que variam entre 0 e 1, ao contrário das lógicas binárias variando apenas entre proposições verdadeiras ou falsas. Assim, a lógica *Fuzzy*, traz afirmações que podem ser parcialmente verdadeiras ou parcialmente falsas, refletindo a realidade onde muitos conceitos não são absolutos, mas têm gradações.

Nas geociências a lógica *Fuzzy* desempenha um papel fundamental no suporte da manipulação de dados complexos e incertezas, em etapas de modelagem, avaliação, otimização e tomada de decisões referentes aos dados geológicos e geoespaciais (Pereira, 2021).

Através da lógica *Fuzzy* foi elaborado um mapa (Figura 21) evidenciando as áreas com maiores possibilidades na ocorrência de rochas máficas-ultramáficas. Para a estruturação destas áreas, foram abordadas as seguintes condições: altas respostas magnéticas; baixas respostas radiométricas para os três radioelementos; e as unidades extraídas através das assinaturas texturais e do método APC.

Em termos quantitativos, as áreas correspondentes a classe “muito alta” endossam um percentual de 13,71% (45.942Km²) da área de estudo, enquanto as demais correspondem a 86,29% (289.313,60Km²).

Figura 21 – Mapa de possibilidade de ocorrência de rocha máfica-ultramáfica (Lógica Fuzzy).



Fonte: autor (2023)

4.7 Mapa Geológico Final

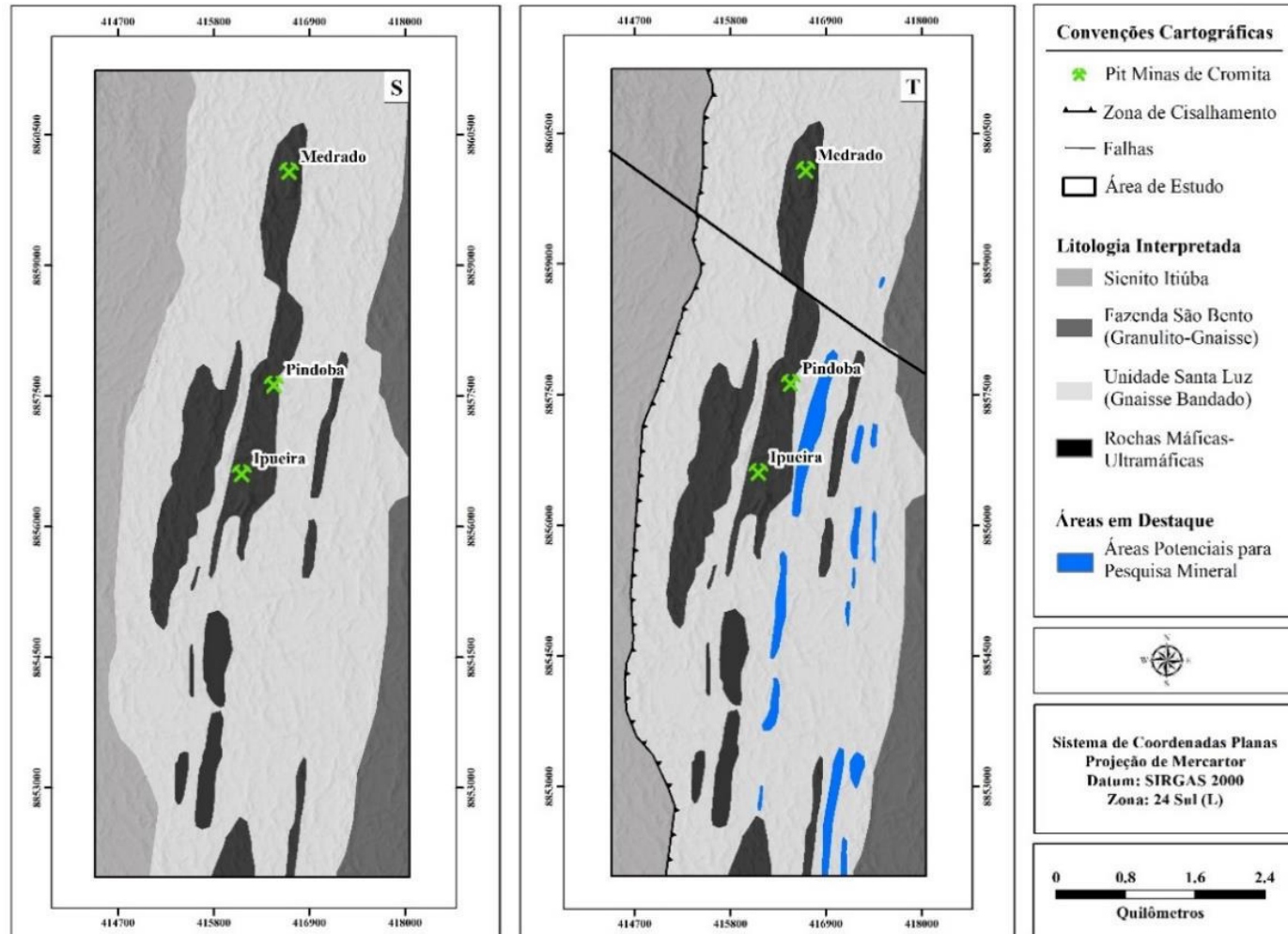
Para a composição do mapa final (Figura 22.S), foram incorporados todos os resultados dos processamentos realizados. Assim, com os resultados integrados, foram ajustados limites litológicos mediante as anomalias magnéticas e análise dos canais radiométricos, como também através das respostas espectrais e assinaturas texturais dos alvos.

Ao analisar os resultados, em relação às rochas máficas-ultramáficas, foram mantidos no mapa final os alvos que apresentavam alguma correlação com os registros bibliográficos. Os demais alvos, foram demarcados como alvos que apresentam nível de importância relevante para pesquisa mineral conforme a figura 22.T. Ao mapa, também foram

acrescidos controles estruturais observados em estudos de níveis regionais e locais registrados em bibliografia e que se assemelhavam com respostas obtidas através dos processamentos no presente trabalho. Dentre essas estruturas, está a falha encaixada na área de estudo no sentido NW-SE na porção superior do mapa, e a zona de cisalhamento presente na borda direita do sienito Itiúba. Esta zona, faz parte do conjunto de zonas de cisalhamento da borda oeste do bloco serrinha.

O modelo geológico final gerado, apresentou um total de 14 áreas alvos com potenciais para pesquisa mineral, totalizando um valor de área em torno de 859.026m², com uma acurácia do modelo de 12,5 metros.

Figura 22 – (S) Mapa ajustado com as litologias presente em bibliografias. (T) Mapa Final.

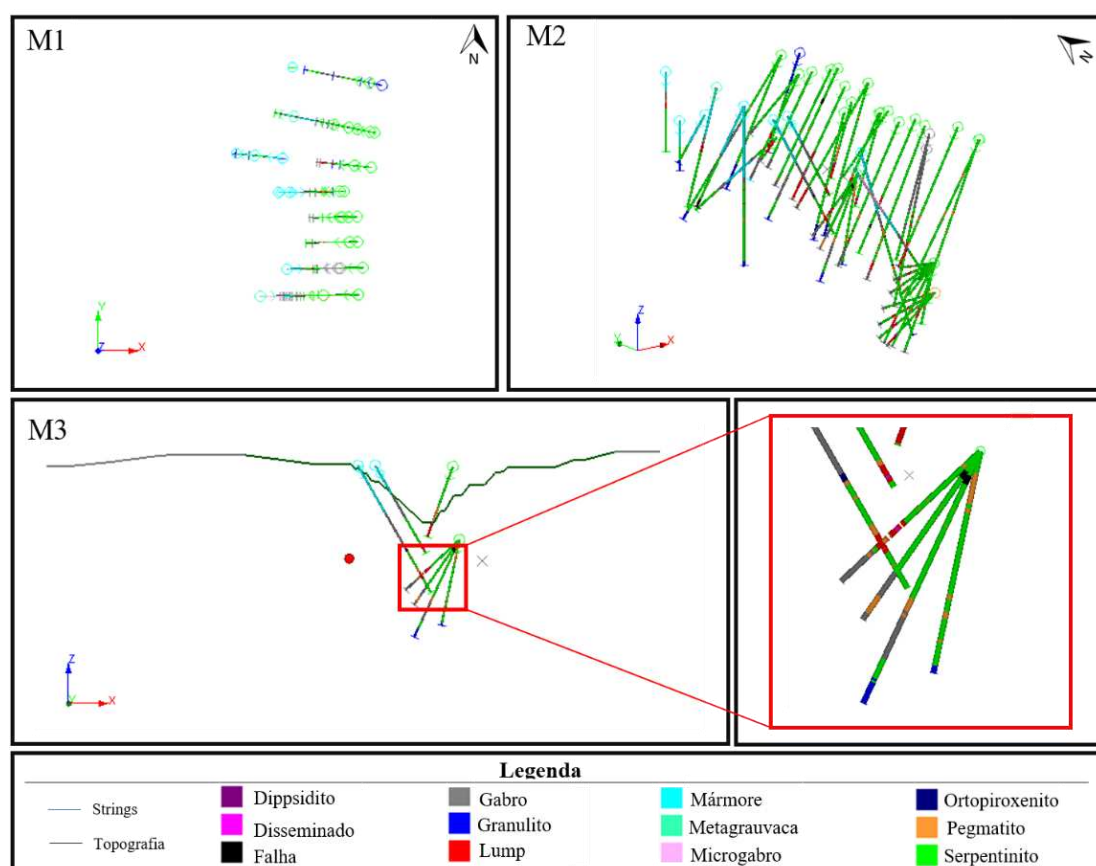


Fonte: autor (2023)

4.8 Modelagem Geológica 3D

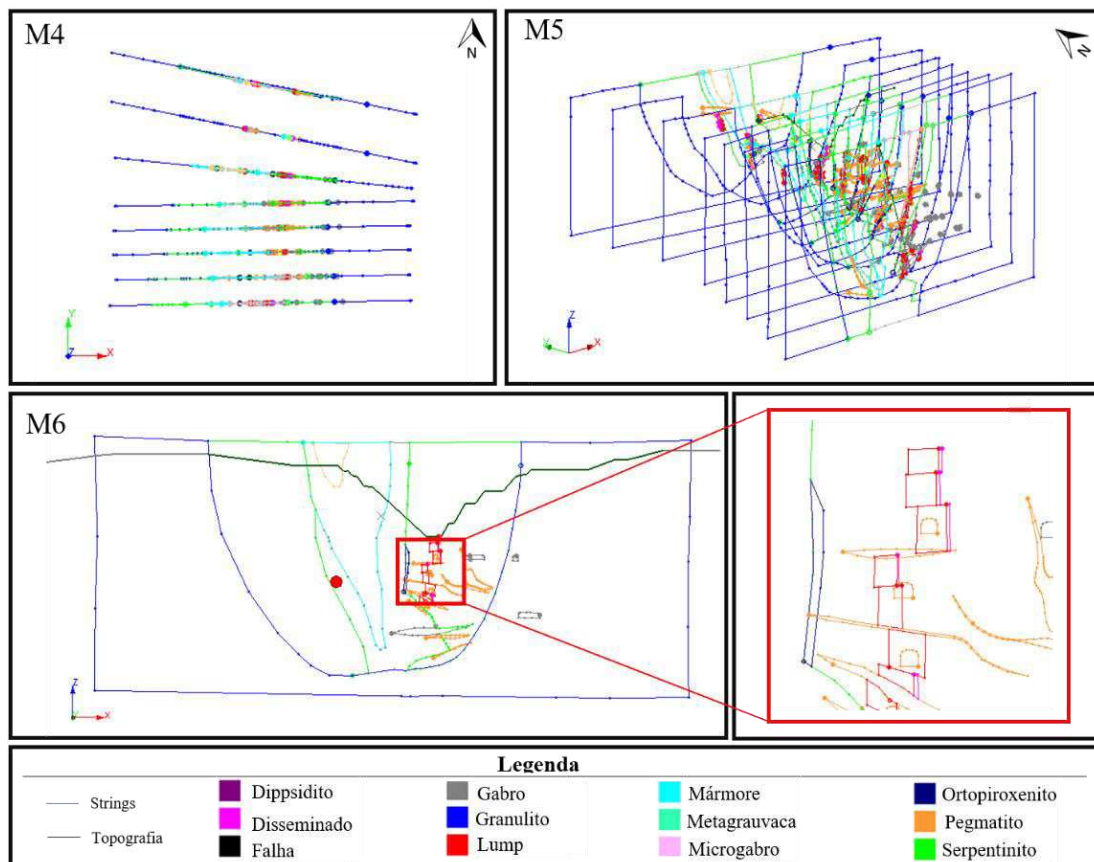
Para a montagem do modelo geológico de medrado, este foi compartimentado em duas porções: norte e central-sul. Seguindo uma ordem sequencial, a primeira porção trabalhada foi o compartimento norte. Para a construção do modelo de blocos deste segmento, foram usadas 08 seções geológicas (Figura 24), abrangendo um total 505 amostras distribuídas ao longo de 49 furos de sondagens (Figura 23). Em questão de comprimento, o modelo apresenta médias em torno de 500 metros no eixo Y (N-S), 600 ao longo do eixo x (L-O) e 300 metros em z (profundidade).

Figura 23 – Furos de Sondagens do Modelo Geológico da porção norte em diferentes percepções. (M1) Vista em planta, (M2) Vista transversal, (M3) Vista em corte de seção com zoom nos furos radiais (em forma de leque)



Fonte: autor (2023)

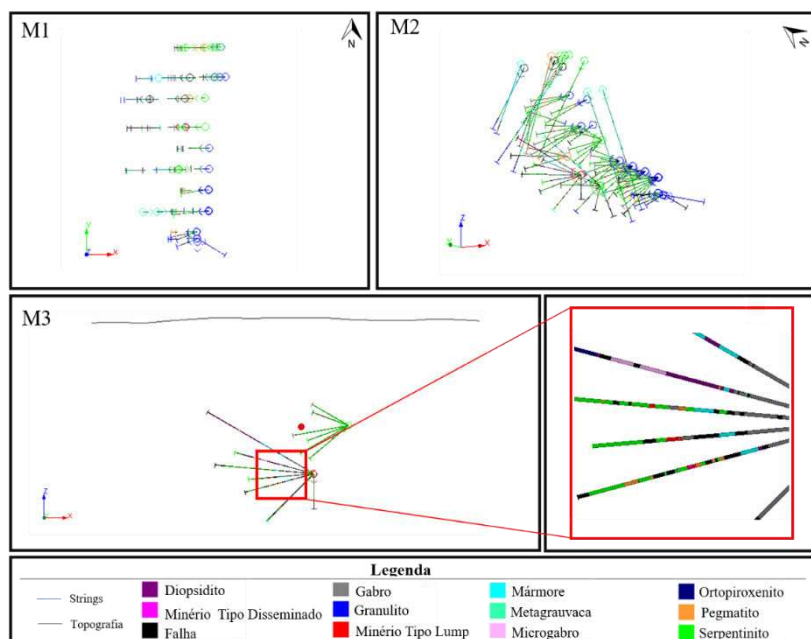
Figura 24 – Seções Geológicas do Modelo Geológico da porção norte em diferentes percepções. (M4) Vista em planta, (M5) Vista transversal, (M6) Vista em corte de seção com zoom na porção onde estão os corpos de minério tipo *lump*



Fonte: autor (2023)

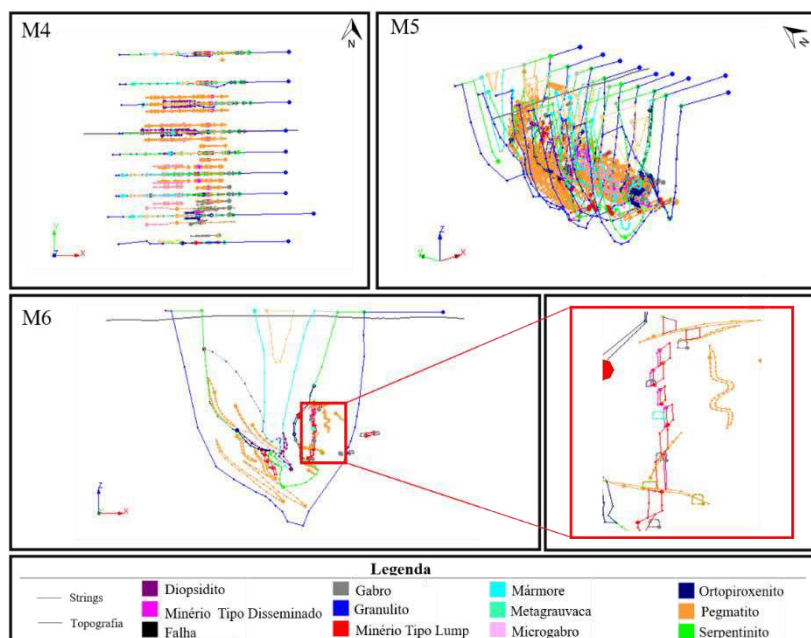
Em relação a porção central-sul, foram utilizadas 9 seções geológicas (Figura 26), totalizando 1.880 amostras ao longo de 134 furos de sondagens (Figura 25) e comprimentos do modelo de 720 metros no eixo Y (N-S), 690 ao longo do eixo x (L-O) e 450 metros em z (profundidade). Em ambos os modelos, os furos de sondagens são representados por dois padrões, sendo um composto por furos com origens individuais, e um segundo com origem idêntica, formando furos radiais em leque. Esses furos radiais do banco de dados, foram gerados em galerias subterrâneas.

Figura 25 – Furos de Sondagens do Modelo Geológico da porção centro-sul em diferentes percepções. (M1) Vista em planta, (M2) Vista transversal, (M3) Vista em corte de seção com zoom nos furos radiais (em forma de leque)



Fonte: autor (2023)

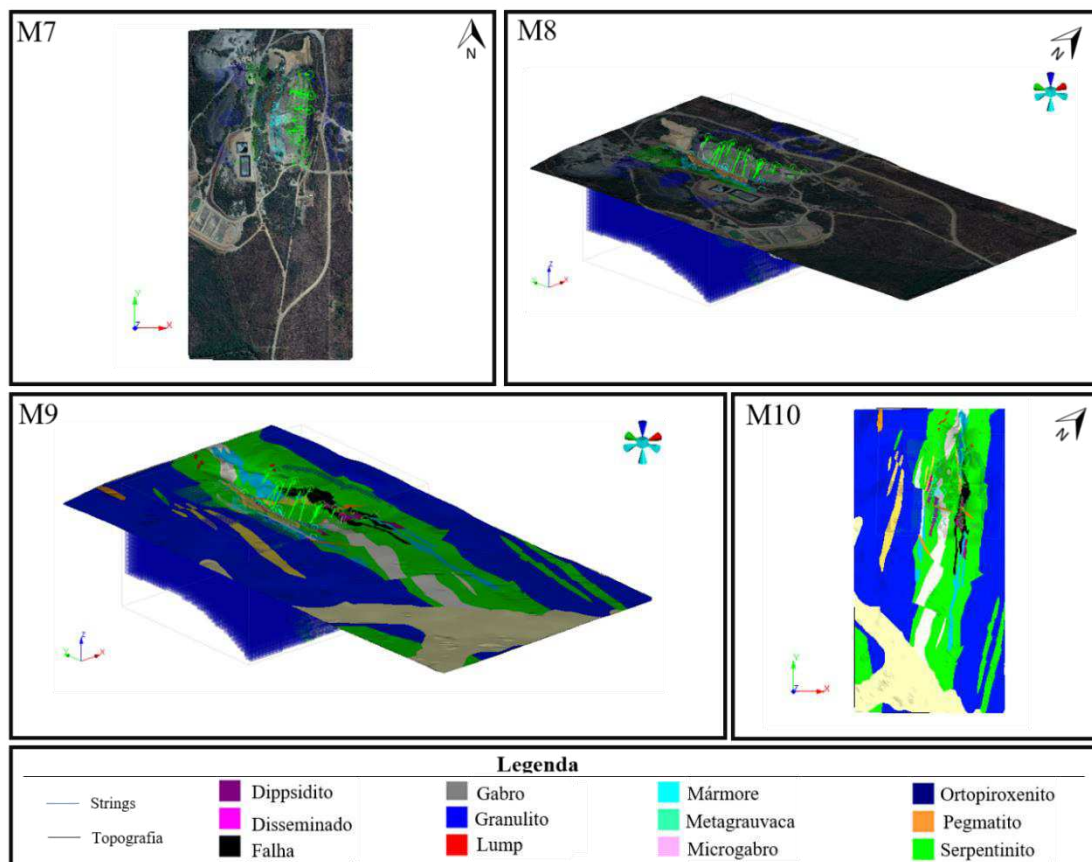
Figura 26 – Seções Geológicas do Modelo Geológico da porção norte em diferentes percepções. (M4) Vista em planta, (M5) Vista transversal, (M6) Vista em corte de seção com zoom na porção onde estão os corpos de minério tipo *lump*



Fonte: autor (2023)

A topografia foi utilizada com uma textura geológica oriunda de um mapeamento geológico interno para balizar os limites das camadas em topografia (Figura 25). A textura em composição RGB cor verdadeira foi utilizada para verificar a localização e espacialização da área da mina de medrado com o modelo geológico.

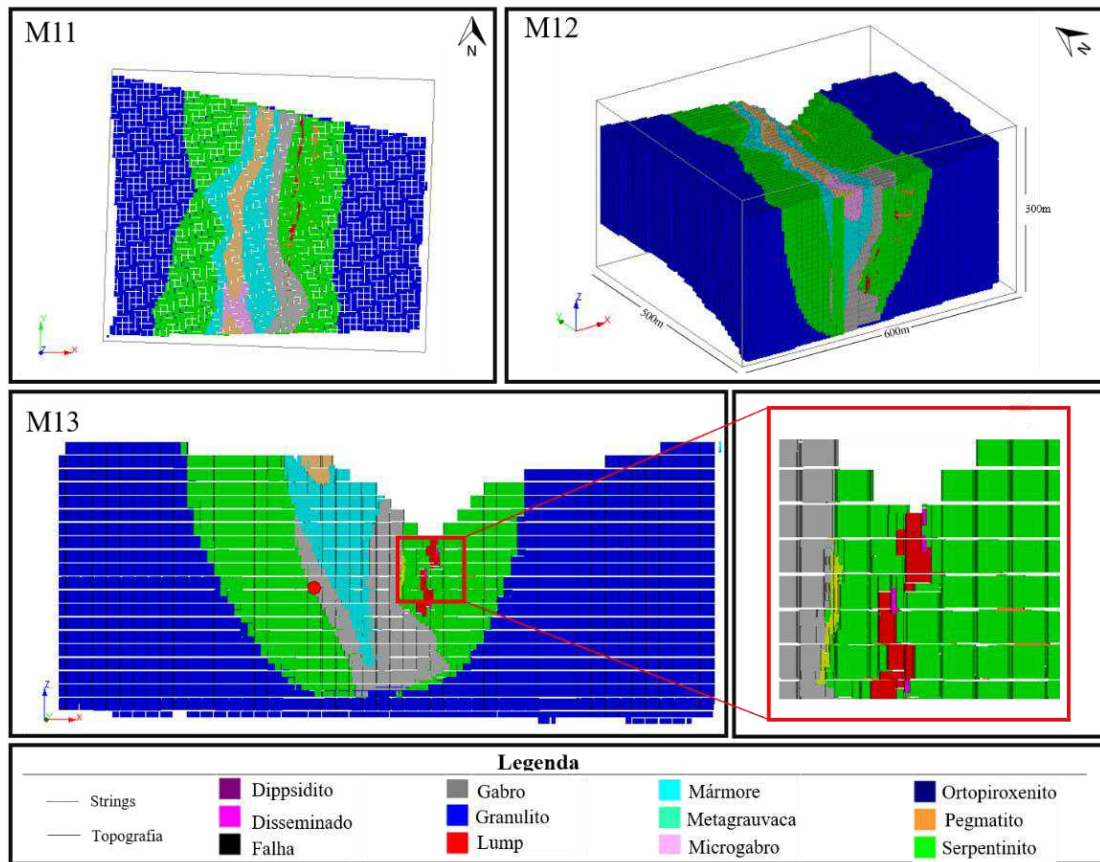
Figura 27 – Topografia da região da mina de Medrado em diferentes percepções. (M7) Vista em planta da topografia em cor RGB cores verdadeiras, (M8) Vista transversal, (M9) Vista em corte de seção, (M10) Vista em planta da topografia com textura litológica



Fonte: autor (2023)

No segmento norte, foram contabilizados cerca de 107.678 mil blocos. Este modelo apresenta as 11 unidades litológicas, como visualizado na Figura 28. Já o modelo da porção centro-sul, apresentam 12 litotipos e contabilizam 285.360 mil blocos (Figura 29).

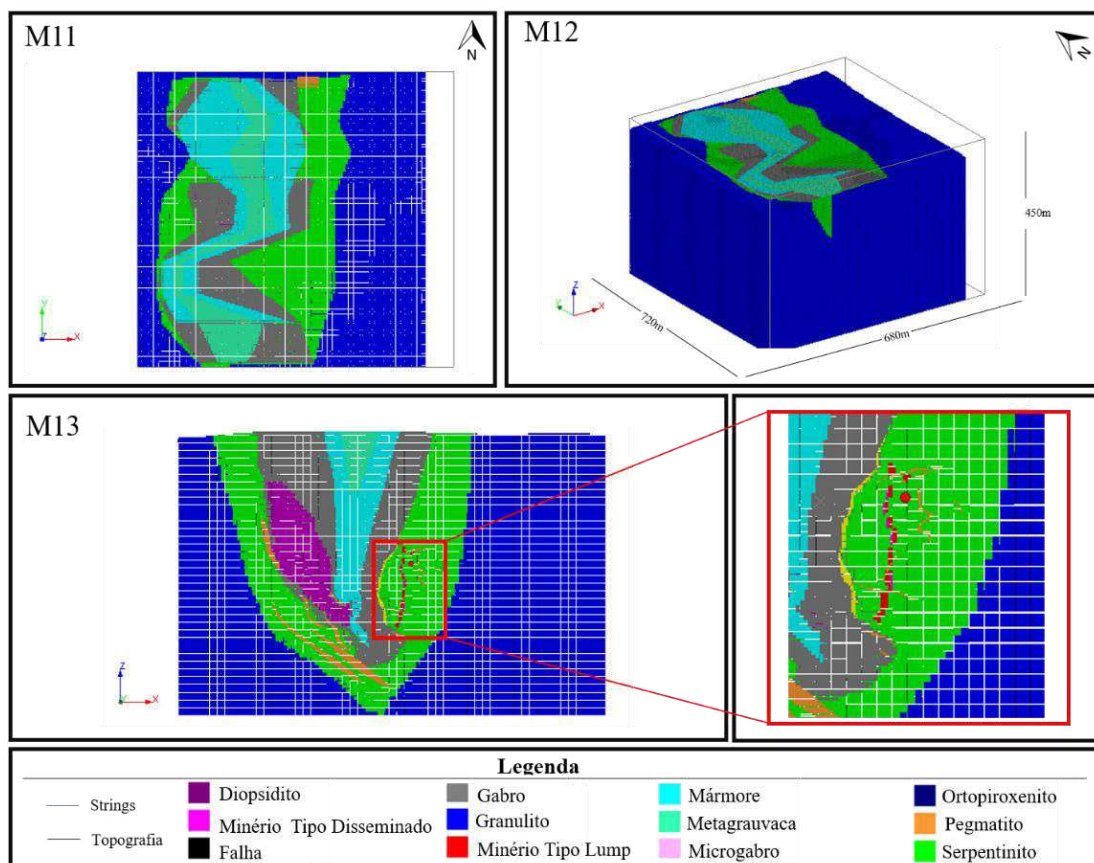
Figura 28 – Modelo de Blocos da porção norte da mina de Medrado em diferentes percepções realçando as litologias e o minério tipo *lump* e disseminado. (M11) Vista em planta, (M12) Vista transversal, (M13) Vista em corte de seção



Fonte: autor (2023)

Figura 29 – Modelo de Blocos da porção norte da mina de Medrado em diferentes percepções realçando as litologias e o minério tipo *lump* e disseminado. (M11) Vista em

planta, (M12) Vista transversal, (M13) Vista em corte de seção

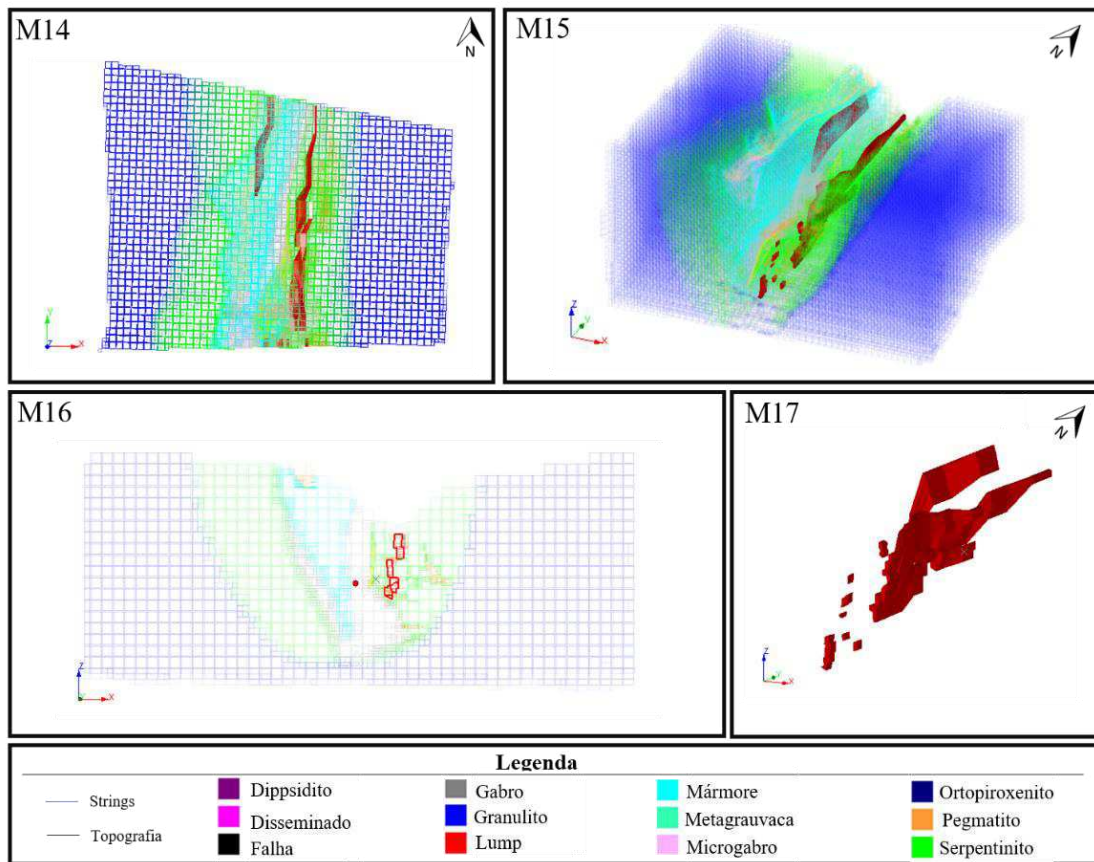


Fonte: autor (2023)

A sequência litológica caracteriza-se por uma sequência máfica-ultramáfica (serpentinito) com uma camada ao topo de rocha máfica (gabro) alojado em uma dobra sinforme encaixado em um granulito. Ao centro da dobra é encontrado um mármore, seguido de metagrauvaca ao topo. Ao longo do modelo, são encontrados veios pegmatíticos, e ortopiroxenito entre o serpentinito e o gabro.

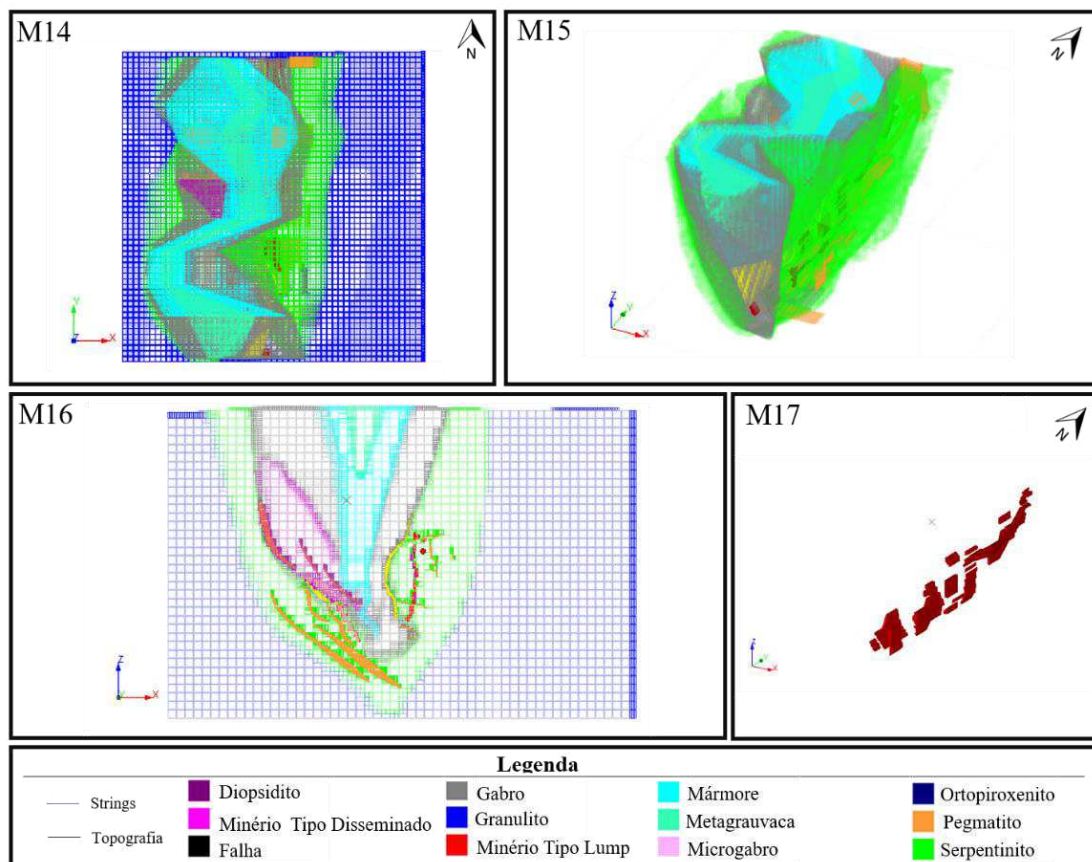
O minério apresenta-se praticamente verticalizado dentro da sequência máfica-ultramáfica (serpentinito) seguindo a direção do *plunge* da dobra (Figura 28 e 29) em ambos os modelos geológicos.

Figura 30 – Modelo de Blocos e realce do corpo de minério tipo *Lump* da região da mina de Medrado em diferentes percepções. (M14) Vista em planta, (M15) Vista transversal, (M16) Vista em corte de seção, (M17) Minério tipo *Lump* em visão transversal



Fonte: autor (2023)

Figura 31 – Modelo de Blocos e realce do corpo de minério tipo *Lump* da região da mina de Medrado em diferentes percepções. (M14) Vista em planta, (M15) Vista transversal, (M16) Vista em corte de seção, (M17) Vista do minério tipo *Lump*



Fonte: autor (2023)

5 DISCUSSÕES

5.1 Sensoriamento Remoto e Aerogeofísica

Todos os resultados, foram comparados com o banco de dados da CPRM (OLIVEIRA, 2016) e outros trabalhos existentes na área disponíveis em rede. Em relação à análise dos produtos obtidos com os dados de Oliveira (2016), este procedimento é configurado apenas como comparação dos resultados (Figura 19 apresentada no tópico dos resultados). Devido a diferença entre escalas de estudo, não foi possível realizar uma validação tendo como base os dados litológicos do mapeamento da CPRM. Com essa diferença de escala reconhecida, outros dados bibliográficos (artigos, teses e dissertações) foram consultados para a interpretação dos alvos litológicos trabalhados nesta pesquisa como o caso da bibliografia de Almeida (2017).

5.1.1 Sienito Itiúba

O sienito Itiúba (unidade “A”) apresentou uma feição de assinatura textural típica de granitóides, com um relevo pouco rugoso e topograficamente apresenta-se como um terreno mais alto que os adjacentes. Essa diferença na rugosidade e características

morfológicas perfaz um forte destaque em comparação com as unidades compostas pelos granulitos e granulitos-gnaiss. Por se tratar de um sienogranito, este apresenta uma baixa resposta magnética. Entretanto, por se localizar a leste de uma zona de cisalhamento, o bordejamento feito entre o sienito e os granulitos-gnaiss, apresenta uma anomalia magnética ao longo desta zona. Essa anomalia pode estar relacionada a zonas de alteração mineral e enriquecimento de materiais ferro-magnéticos. Seus altos valores presentes no canal do K, e baixos de eTh e eU é típico de rochas sieníticas ultrapotássicas.

Vinculado ao corpo sienítico, é vista uma estrutura cortando a área de estudo no sentido NW-SE. Nesta estrutura, geomorfologicamente, está encaixada a drenagem, e ao longo dela, é notada uma forte anomalia potássica. Assim, esta estrutura é assemelhada a um possível veio pegmatítico com origem no sienito.

5.1.2 Unidade Santa Luz

A unidade Santa Luz é fortemente marcada por estruturas de empurrão de leste a oeste (unidade morfológica “B”). Com esta orientação, formaram-se estruturas orientadas no sentido N-S, onde bibliograficamente, suas feições são semelhantes aos granulitos-gnaissicos da Unidade Santa Luz. Nesta unidade também estão presentes outras litologias, como metagabronoritos, cromitito, metapiroxenito, metanorito e lentes de mármore. Assim, com esta configuração litológica, é vista uma baixa a média resposta magnética, e valores radiométricos baixos para K e eU e altos para eTh. Estas respostas magnéticas são típicas das rochas presentes nesta unidade, e fazem um forte contraste com as rochas máficas-ultramáficas do complexo do Vale do Jacurici.

5.1.3 Unidade Fazenda São Bento

Diferentes das demais unidades descritas, os granulitos da Unidade Fazenda São Bento (unidade morfológica “C”) apresentam assinatura textural que menos se destaca. Entretanto, por ser uma porção mais distal da zona de cisalhamento presente entre o Sienito Itiúba e as rochas da Unidade Santa Luz, esses granulitos apresentam pouca influência do controle estrutural orientado N-S. O que é observado são padrões de orientações entre difusos e levemente orientados a NE-SW. Isto acaba gerando uma morfologia mais rugosa. De forma geral, apresentou baixa resposta magnética. Entretanto, através de algumas anomalias magnéticas identificadas com base na primeira derivada horizontal, permitiu-se o delineamento dos limites da borda leste da Unidade São Bento. Suas respostas magnéticas, são razoavelmente parecidas com a Unidade Santa Luz, com valores do canal do K entre médio a alto, e entre baixo e médio para eU e eTh.

5.1.4 Rochas Máficas-Ultramáficas do Complexo Vale do Jacurici

As rochas do complexo máfico-ultramáfico do Vale do Jacurici, dentre as unidades supracitadas, para análise foi a única que se obteve bons resultados através do método APC. Com este método, tomou-se registro uma orientação dos corpos bem marcados no sentido N-S, como era esperado bibliograficamente. Entretanto, ao aplicar este método, não foi possível subdividir litotipos que apresentavam respostas espectrais semelhantes. Dentre estas litologias, estão depósitos típicos de Formações Ferríferas Bandadas (BIF) e granulitos máficos que não se distinguem dos cromititos e serpentinitos através deste método. O zoneamento da porção máfica-ultramáfica é bem destacada através das respostas dos métodos magnéticos, onde produtos como ASA e AGHT contornaram bem os limites da anomalia. Como geralmente esses tipos de rochas apresentam baixo valores para os três radioelementos, na composição ternária é visualizado em tom de coloração preta. Dentro destas zonas, são observadas pequenas anomalias de eU. Estas anomalias podem estar relacionadas com alterações hidrotermais ou está vinculado a rochas metamórficas encaixantes da Unidade Santa Luz.

Para a interpretação das rochas máficas-ultramáficas, através do mapa de possibilidades (Figura 22), as classes estabelecidas deram suporte para a interpretação geológica. Nas porções caracterizadas como “Muito Baixo” e “Baixo”, em termos de possibilidades de ocorrência, está marcando as rochas do Sienito Itiúba e a estrutura (NW-SE) ligada ao sienito. Essa condição, faz sentido uma vez que o granito apresenta baixa resposta magnética, e alta radiância no canal do K. Em contra partida, as unidades do Vale do Jacurici também ficaram bem marcadas na classe “Muito Alta” do mesmo mapa. Isso se deve à condição de baixa resposta da radiância dos três radioelementos e alta resposta magnética. Estas áreas, também apresentaram correlações com áreas já mapeadas com ocorrência de rochas máficas-ultramáficas (OLIVEIRA, 2016; ALMEIDA, 2017).

5.2 Modelagem Geológica

O modelo geológico desenvolvido traz uma releitura da geologia da mina de Medrado. Dentre essas novas análises, observa-se que a camada do mármore segue o *plunge* da dobra e toda a área é fortemente regida por controles estruturais.

Dentre os principais controles estruturais sobre a área, a tensão projetada no sentido leste para oeste é a mais importante na determinação da dobra e estruturas de falhas. Essa direção do tensor (L-O), faz com que as rochas sejam pressionadas contra uma zona mais estável próxima ao sienito Itiúba. Assim, as rochas passam a sofrer deformações, e por consequência formando a dobra sinforme com cromititos hospedados

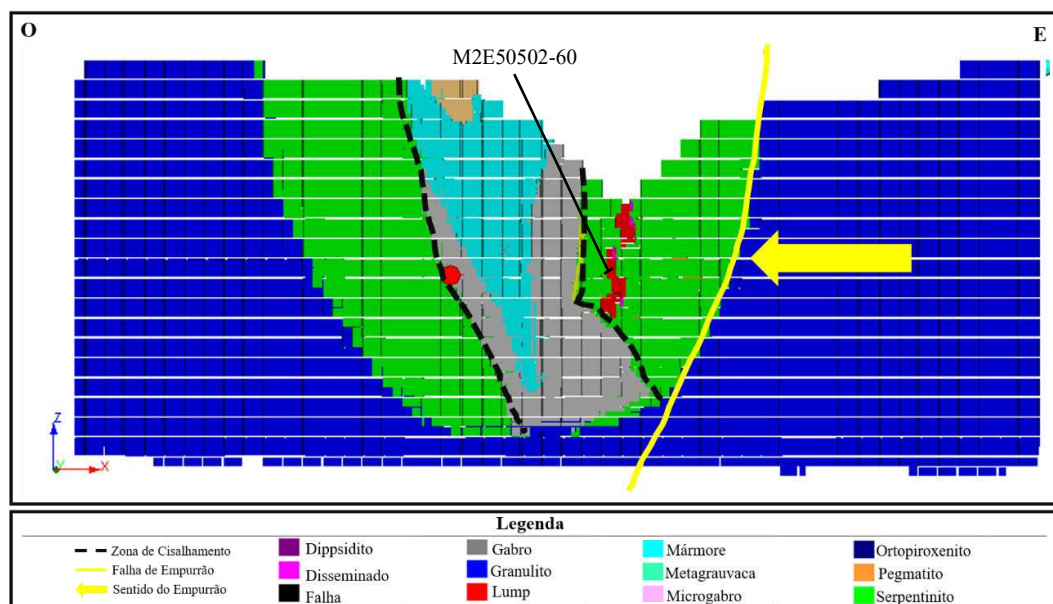
na sequência máfica-ultramáfica composta pelos serpentinitos. A tensão projetada nessa direção também define uma zona de falha entre o granulito e o serpentinito no flanco leste. Essas diferenças nas tensões podem ser observadas ao analisar os flancos do modelo, onde é possível notar uma suavização da dobra em direção ao oeste.

Do ponto de vista genético, os cromititos se formam de forma horizontalizada junto à sequência máfica-ultramáfica, como observado nos modelos geológicos do segmento de Ipueira. No entanto, no segmento de Medrado, ocorre uma variação em relação a esse padrão, uma vez que os depósitos máfico-ultramáficos cromitíticos estão dispostos de forma verticalizada. Essa verticalização é resultado de eventos estruturais posteriores à formação do depósito, que causaram a rotação dos depósitos tabulares de cromo. Esses eventos estruturais contribuíram para a configuração atual dos depósitos, fugindo ao padrão observado em outros depósitos similares. O primeiro evento ocorreu em processos de empurrão ainda no proterozóico à 2,08Ga, seguindo de processos transcorrentes configurando o segundo evento entre 1,8 e 1,9Ga.

Ao analisar os modelos geológicos, podemos observar uma sequência de formação que segue os padrões típicos dos depósitos cromitíticos estratiformes. Na base dessa sequência encontra-se uma rocha máfica-ultramáfica, seguida por rochas máficas, representadas principalmente pelo serpentinito e gabro. Acima dessas rochas, ocorrem camadas litológicas metamórficas de origem sedimentar, como mármore, metagrauvacas e metacherts. Essa sequência é condicionada com o intenso regime estrutural presente na área de estudo, onde são observados diversos tipos de deformações, incluindo dobras e falhas. Entre as camadas de serpentinito e gabro, há uma zona de contato que exhibe a presença de ortopiroxenitos. Esse contato é interpretado como uma zona de cisalhamento de transcorrência tardia, indicando um evento tectônico posterior à formação dos depósitos cromitíticos (Figura 32). A análise dos modelos geológicos fornece informações valiosas sobre a evolução geológica da área e os processos responsáveis pela formação dos depósitos de cromo.

Figura 32 – Seção do modelo de blocos da região da mina de Medrado, com realce das

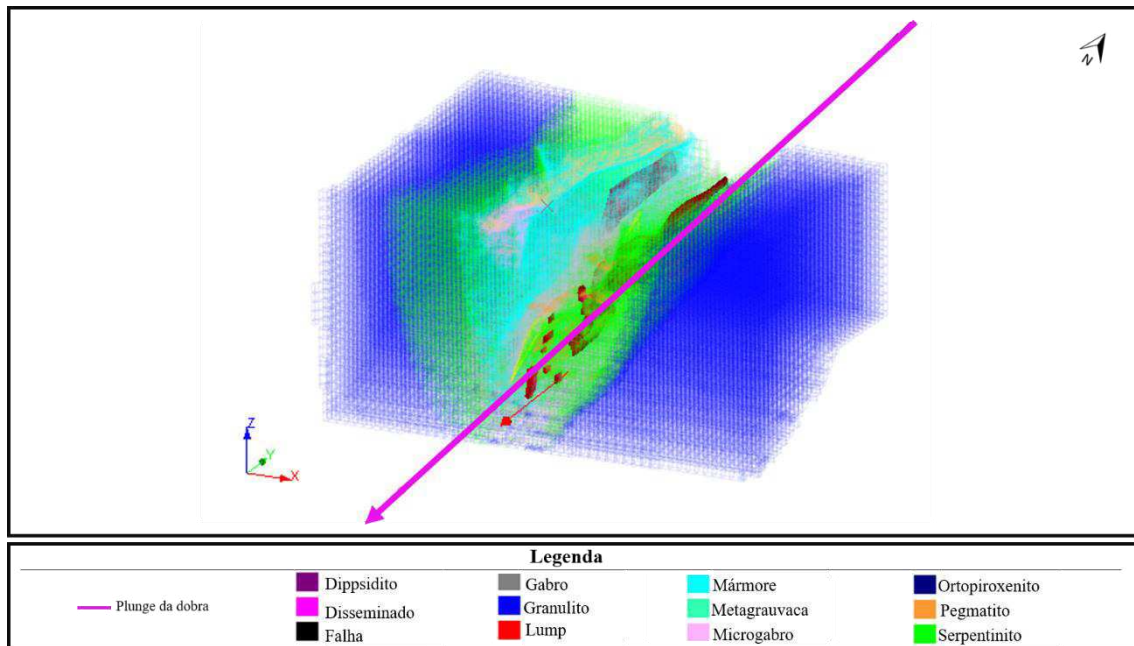
zonas de cisalhamento, falhas de empurrão à leste e sentido de empurrão



Fonte: autor (2023)

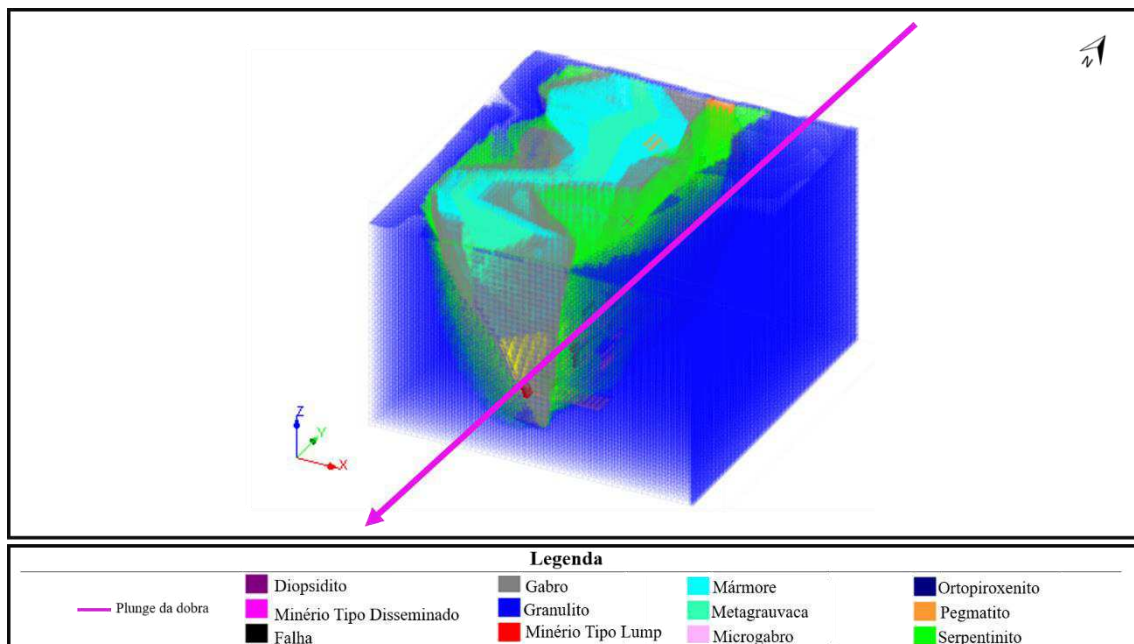
Os cromititos em Medrado apresentam uma orientação praticamente vertical, e à medida que as seções vão se aprofundando, é observado um aumento na espessura do corpo cromitítico. Além do aumento de volume, esse minério segue o mergulho da dobra, com um ângulo em torno de 30°, conforme ilustrado na figura 32, configurando uma zona de transcorrência. Essa característica indica a existência de uma tendência de mineralização na camada de minério, que se desenvolve ao longo da direção do eixo da dobra em níveis mais profundos (Figura 33 e 34). Em contexto geral, ao combinar os modelos geológicos da porção norte e centro-sul de Medrado, é visualizado o mesmo padrão de continuidade seguindo o *plunge* da dobra (Figura 35) em cotas mais profundas.

Figura 33 – Modelo de blocos da porção norte da mina de Medrado com realce do sentido do plung da dobra, evidenciando o sentido da mineralização do minério tipo *Lump*



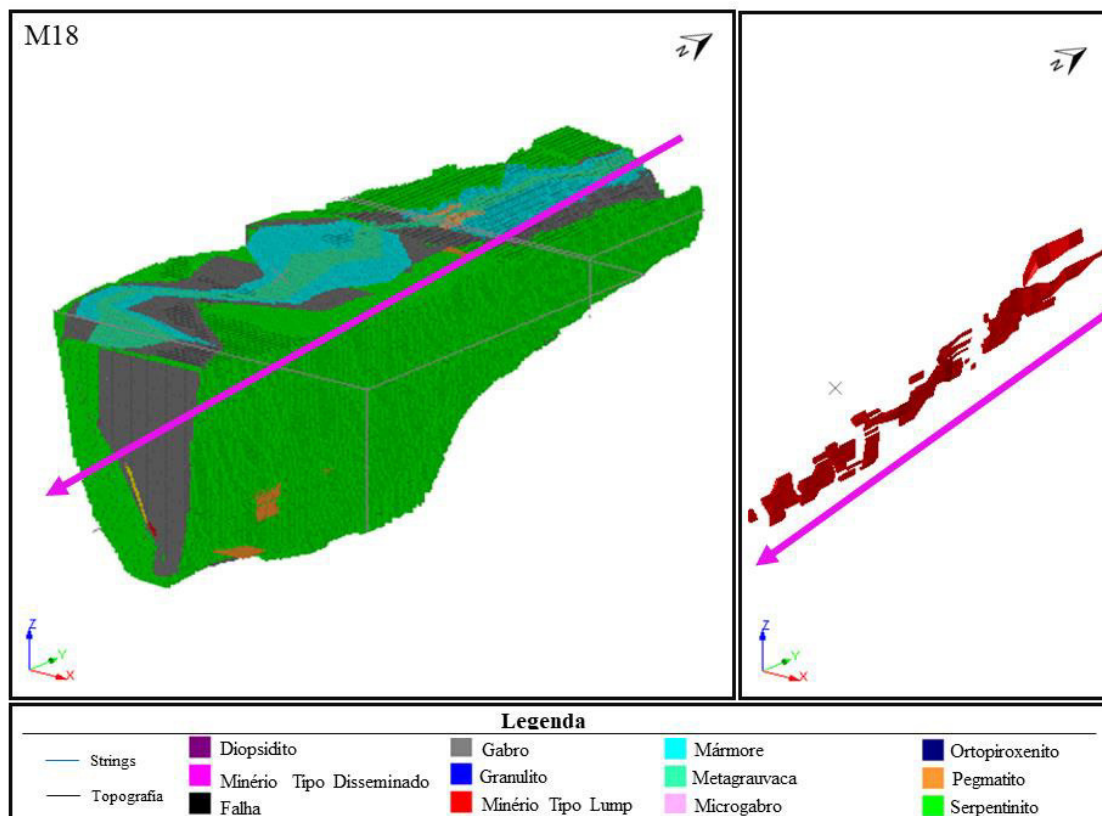
Fonte: autor (2023)

Figura 34 – Modelo de blocos da porção norte da mina de Medrado com realce do sentido do *plunge* da dobra, evidenciando o sentido da mineralização do minério tipo *Lump*



Fonte: autor (2023)

Figura 35 – Modelo Geológico geral da mina de Medrado combinando as porção norte e Centro-Sul com realce do sentido do *plunge* da dobra, evidenciando o sentido da mineralização do minério tipo *Lump*



Fonte: autor (2023)

Ao combinar os resultados da interpretação de imagens de sensoriamento remoto e os mapas geológicos com o modelo geológico 3D da porção norte, é evidente que esses produtos proporcionaram uma boa delimitação das rochas máficas e ultramáficas na superfície. No entanto, é importante ressaltar a importância de um controle de campo detalhado, uma vez que os granulitos máficos podem apresentar respostas semelhantes aos cromititos. Essa análise de campo é fundamental para uma interpretação precisa e confiável dos diferentes corpos rochosos.

5.3 Cubagem

Em termos volumétricos e em massa total, as porções que apresentam o minério de Cr_2O_3 compõem uma pequena parcela do volume de rocha. Os dados volumétricos e tonelagem de rochas estão descritos na Tabela 10.

Tabela 8 – Volumetria geológica e cubagem do depósito de cromo da mina de Medrado

Litologia	PORÇÃO NORTE		PORÇÃO CENTRO-SUL	
	Volume (m ³)	Toneladas (t)	Volume (m ³)	Toneladas (t)
Granulito	40.302.371,98	104.786.167,10	137.005.487,00	356.214.266,20
Serpentinito	13.675.575,26	38.291.610,73	34.813.251,73	97.477.104,84
Gabro	3.938.602,45	11.421.947,11	23.113.396,65	67.028.850,29
Mármore	4.061.414,89	10.965.820,20	15.132.335,26	40.857.305,20
Metagrauvaca	227.862,10	638.013,88	3.303.250,66	9.249.101,84
Microgabro	127.174,15	368.805,03	156.326,29	453.346,24
Ortopiroxenito	310.093,67	102.331,91	167.484,28	552.698,12
Minério Tipo Lump	181.190,49	851.595,30	267.765,04	1.258.495,68
Minério Tipo Disseminado	7.408,14	34.818,25	9.502,41	44.661,32
Pegmatito	144.844,06	405.563,36	1.257.129,66	3.519.963,04
Diopsidito	-	-	1.035.156,25	3.312.500,00
Total	62.697.453,19	167.866.672,90	216.261.085,20	216.261.085,26

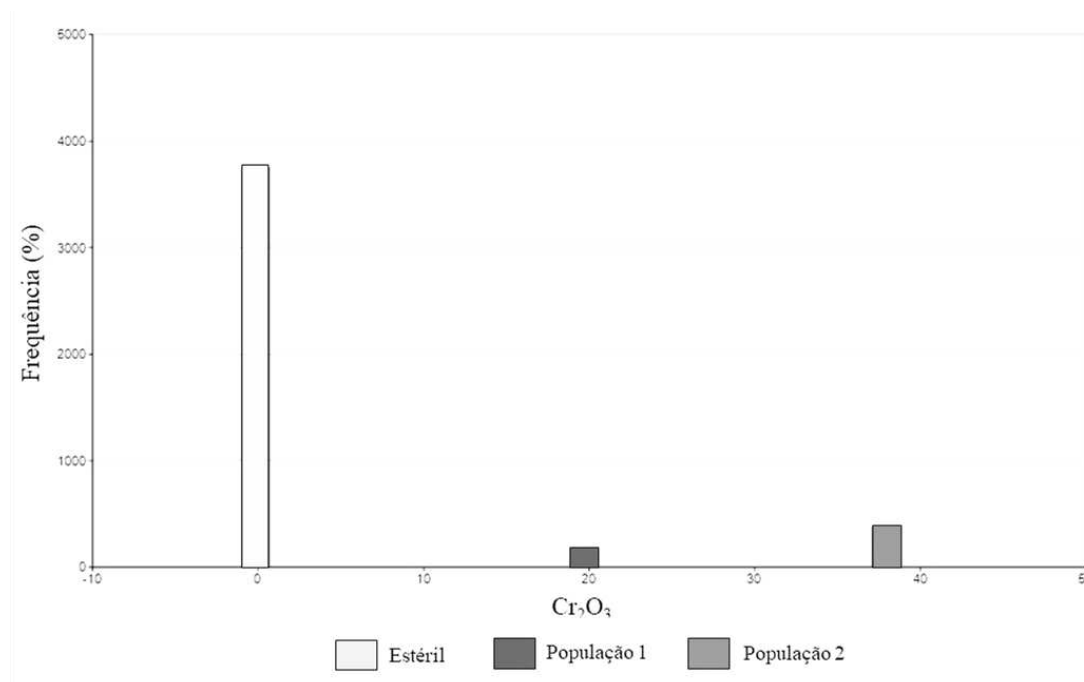
Fonte: autor (2023)

O minério tipo *lump*, cujo é o principal alvo prospectivo da mina de medrado contabilizou um volume total de 465.869,08m³ e massa de 2.189.570,55T, em relação ao volume e massa total, são respectivamente 016 e 054% de volume e massa de rocha de calculado de medrado.

5.4 Análise Geoestatística

Ao todo, o banco de dados conta com 4.320 amostras distribuídas entre 316 furos de sondagens. Deste total de amostras com enfoque no minério tipo *lump* e disseminado, constam respectivamente, 386 e 189 amostras, o que corresponde a 8,93 e 4,38% do total de amostras. No banco de dados, em relação ao percentual de óxido de cromo, esses dois tipos de minérios configuram duas populações amostrais (Figura 36). Assim, em relação as mineralizações e seus registros nas tabelas, são definidos os seguintes valores: -1 para amostras estéreis, 38% para minério tipo *lump* e 20% para minério tipo disseminado.

Figura 36 – Análise das populações de amostras do banco de dados do banco de dados da mina de Medrado



Fonte: autor (2023)

Com base na distribuição das amostras no depósito mineral, foram calculados semivariogramas experimentais para a variável Cr_2O_3 . Assim, foram estabelecidas 3 classes baseadas no percentual do minério (uma classe referente as rochas estéreas e duas classes em relação as porções com minério, ambas alojadas no serpentinito).

Para o desenvolvimento do trabalho em questão foram utilizados 2 algoritmos distintos para interpolação dos dados na malha amostral, sendo o primeiro um método determinístico e o segundo um estocástico, são eles respectivamente: o vizinho mais próximo (devido sua simplicidade e por assegurar que o valor interpolado seja um dos valores originais); e a krigagem ordinária (envolve o cálculo da média local).

Para a implementação do algoritmo de krigagem ordinária foram criados variogramas experimentais. De acordo com Lourenço (2005), os métodos de estimativa krigagem são baseados em médias móveis, de valores de variáveis, distribuídas no espaço a partir de valores adjacentes, considerados como interdependentes por uma função denominada variograma (no trabalho em questão, um semivariograma). Os semivariogramas foram modelados para cada variável em estudo, gerando assim as direções de maiores continuidades.

Os semivariogramas obtidos (Tabela 8) foram ajustados à estrutura esférica (Sph), uma vez que esse modelo de transição se ajusta para modelar fenômenos que possuem capacidade infinita de dispersão. Através destes semivariogramas e analisando a variabilidade do teor dos valores percentuais de Cr_2O_3 , percebeu-se que os pontos dos

variogramas não alcançaram a estacionariedade em torno da variância, e apresentou um efeito pepita de 13,42. Com o variograma experimental obtido, foi realizada a validação do resultado através do método da validação cruzada.

Tabela 9 – Estruturas dos semivariogramas gerados para variável Cr_2O_3

SEMIVARIOGRAMAS GERADOS	
Semivariograma	
Modelo	Esférico
Efeito Pepita	13,42
Alcance em X	79
Ângulo de rotação do eixo (X)	40°
Alcance em Y	154.3
Ângulo de rotação do eixo (Y)	30°
Alcance em Z	36.4
Ângulo de rotação do eixo (Z)	50°
Variância	-

Fonte: autor (2023)

O teste de validação cruzada tem como objetivo principal a avaliação do modelo geoestatístico gerado, a configuração de estimação (janela móvel), volume de busca e o modelo de variograma teórico ajustado. O procedimento para a execução do teste é feito para cada amostra, onde o valor da variável regionalizada é estimado.

Para a validação do modelo foram realizados os cálculos para os seguintes erros:

- Erro médio:

$$EM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_r(x_i)$$

- Erro Quadrático Médio:

$$ERQM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{[E_r(x_i)]^2}{\sigma_k^2}$$

O erro de estimação real permitiu a obtenção dos resíduos da validação cruzada, consistindo entre a diferença entre os valores krigados e os reais. Esses valores do erro estimado, foram usados para a determinação do primeiro parâmetro, o erro médio (EM) e posteriormente, o mesmo foi utilizado para o cálculo do ERQM (Erro quadrático médio). Os resultados finais dos parâmetros dos erros foram organizados na tabela abaixo (Tabela 10).

Tabela 10 – Resultados oriundos da Validação Cruzada para a variável Cr₂O₃

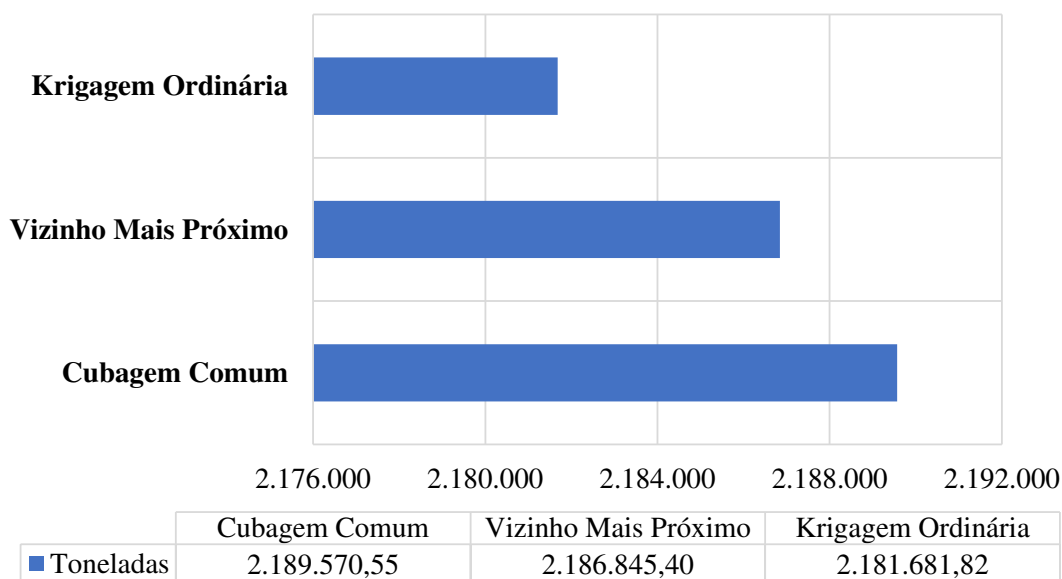
ALGORÍTMO	EM	ERQM
Krigagem Ordinária	0,0012	0,0072
Vizinho mais próximo	-0,0907	0,0001

Fonte: autor (2023)

De acordo com o proposto pelos algoritmos utilizados, entende-se que quando os parâmetros de EM tende a 0 e o ERQM a 1, é assumido que a qualidade da estimação é muito boa. Para ambos resultados da validação, o valor de EM ficou próximo a 0, entretanto o ERQM ficou distante de 1. Essa condição implica que haja uma sub estimação dos valores de Cr₂O₃. Portanto, diante da tabela apresentada (Tabela 9), a variável Cr₂O₃ não apresentou valores aceitáveis para análise via geoestatística por krigagem ordinária e vizinho mais próximo, com valores respectivamente para ambos os métodos de EM 0,0012 e -0,0907 e ERQM de 0,007 0,0001.

Ao analisar os resultados obtidos através do método clássico de cubagem com os métodos geoestatísticos empregados neste trabalho, nota-se uma atenuação dos valores através dos algoritmos do Vizinho Mais Próximo e Krigagem Ordinária (Gráfico 1). Assim, observa-se uma subestimação do depósito, semelhante ao que se é observado através dos resultados obtidos durante a etapa de validação dos modelos geoestatísticos (Tabela 9).

Gráfico 1 – Comparativo entre os resultados da Krigagem Ordinária, Vizinho Mais Próximo e Cubagem Clássica



Autor (2023)

6 CONCLUSÃO

Com esse estudo foi possível a implementação de diferentes técnicas de geoprocessamento de imagens orbitais e tratamentos de dados aerogeofísicos magnéticos e radiométricos para caracterização geológica. Cada técnica empregada, permitiu a obtenção de informações distintas sobre os controles estruturais e dimensões dos limites dos corpos litológicos. Através dos dados de radar, foram estruturados os limites das litologias das Unidades Santa Luz e Fazenda São Bento, como também os padrões das assinaturas texturais do Sienito Itiúba. Já com a técnica da Análise das Principais Componentes, percebeu-se boa eficácia para extração das respostas espectrais, que bibliograficamente correspondem aos corpos máficos-ultramáficos do Complexo Vale do Jacurici. Os dados aerogeofísicos, complementaram no delineamento das anomalias magnéticas e na interpretação litológica por meio das respostas radiométricas dos canais de U, Th e K.

O Sienito Itiúba e as rochas máficas-ultramáficas da área, foram as litologias que apresentaram respostas mais expressivas através dos métodos empregados. Os corpos máficos-ultramáficos seguem o padrão que se é observado em bibliografia. Este padrão é observado através do alinhamento no sentido N-S e encaixados em maior parte em granulitos da unidade Santa Luz. Notou-se também, um forte enriquecimento potássico seguindo a estrutura NW-SE, onde está inserida a drenagem local. Essa anomalia potássica, pode estar correlacionada geneticamente ao sienito, levantando a hipótese de

um possível pegmatito. Entretanto, para tal afirmação, é necessário a realização de estudos de campo e análise de testemunhos de sondagens deste segmento.

Ao comparar com os dados bibliográficos usados como base para a pesquisa, os corpos máficos-ultramáficos obtidos no trabalho que apresentavam correlação com o material base, foram destacados como rochas máficas-ultramáficas. Os demais corpos, foram destacados como áreas potenciais para pesquisa mineral como apresentado no Mapa Final. Entretanto, o método usado de Análise das Principais Componentes (APC), apresentou dificuldade na diferenciação das rochas do complexo do Vale Jacurici, dos BIF e dos granulitos máficos devido à similaridade nas respostas espectrométricas. Na etapa de integração dos dados, a combinação da álgebra de mapas com a implementação da lógica *Fuzzy* trouxeram bons resultados, e deram suporte para a elaboração do mapa final. A metodologia empregada para caracterização geológica superficial apresentou resultados satisfatórios, pois através destes resultados novos alvos foram identificados (14 novos alvos, totalizando 859.026,84m²) como áreas potenciais para pesquisa mineral e áreas já reconhecidas como alvos, foram realçadas gerando um modelo geológico superficial com acurácia de 12,5 metros.

Em relação modelo geológico percebeu-se que a verticalização dos depósitos cromitíferos estão correlacionados a condicionantes estruturais tardias a sua gênese visualizada nas duas porções, norte e centro-sul. Vale ressaltar também, que através da modelagem, foi destacada uma característica importante sobre o minério em questão, à medida em que se aprofunda no solo, o corpo do minério tende a ficar mais espesso e seguindo o *plunge* da dobra. O reconhecimento desta característica é de grande importância para o planejamento e operacionalização da mina a longo prazo.

Nas porções mais ao sul do modelo geológico centro-sul, é notado que as camadas da sequência máfica-ultramáfica (gabro e serpentinito) vão reduzindo o volume. Isso pode estar ocorrendo devido a estar chegando ao final das sequências máfica-ultramáficas ou pode ter ocorrido movimento de blocos, aprofundando ainda mais as rochas desta sequência. Assim, como validação completar, poderiam ser realizados furos complementares a 90° na porção mais a sul e oeste do modelo centro-sul para verificar se não à continuidade em cotas ainda mais profundas.

Após a realização da geoestatística do modelo geológico, percebeu-se que a configuração do banco de dados trouxe limitações para a análise na configuração dos parâmetros de análise. Isso se deve ao fato da baixa variabilidade no teor de cromo, sendo presente apenas 38% referente ao minério tipo *lump* e 20% referente ao minério tipo disseminado. Essa configuração do banco de dados, mostrou a presença de duas

populações, o que fez que o efeito pepita se tornasse praticamente puro. O baixo valor de ERQM encontrado nas etapas de validações e a posterior comparação com o gráfico dos resultados dos métodos de cubagem, mostra uma subestimação dos algoritmos empregados. Assim, sugere-se a aplicação de uma análise por sequências de janelas móveis para observar os locais onde a estimação foi menos e mais efetiva. O método estocástico Vizinho Mais Próximo apresentou limitações devido à ausência de médias de variáveis contínuas.

Diante disto, surgem dois pontos sugestivos para melhorar a análise dos dados. O primeiro seria a utilização da Krigagem da Indicatriz como método geoestatístico devido a estrutura dos dados.

Uma segunda sugestão, seria a aprimoração dos estudos geoquímicos do modelo. Ou seja, coleta de amostras dos corpos cromitíferos para um estudo detalhado da distribuição geoquímica do óxido de cromo mediante seus percentuais. Com isso, além do aprimoramento do entendimento geoquímico do modelo, conseqüentemente aprimoraria a análise geoestatística, tornando-a mais robusta e detalhada.

O minério tipo *lump* é o principal alvo de extração na mina, seguido pelo minério tipo disseminado. O volume desses dois tipos corresponde a 1/6 do total do depósito, sendo 448.955,53 m³ para o minério tipo *lump* e 10.910,55 m³ para o minério tipo disseminado. Em termos de toneladas de rocha referentes ao minério tipo *lump* e disseminado, correspondem respectivamente à 2,11Mt e 0,07Mt.

De acordo com a literatura, estima-se que a reserva de minério para todo o segmento Ipueira-Medrado seja de quase 3,9 milhões de toneladas, com teor de 38% (BIONDE, 2015). Portanto, a porção norte e centro-sul trabalhada neste projeto representa 54,10% desse total.

Em 8 de fevereiro de 2022, foi publicada a Resolução ANM nº 94, em que o Diretor Geral normatiza o inciso XXXV do art. 2º da Lei nº 13.575, de 26 de dezembro de 2017 que disciplina a classificação das reservas minerais, com base em padrões internacionalmente aceitos de declaração de resultados. Assim, para critérios de classificação das reservas minerais, passam a serem utilizadas duas definições diante do grau de certeza, reserva provável e provada. A reserva provável é a porção economicamente lavrável de um recurso mineral indicado e, sob determinadas circunstâncias, de um recurso medido. A confiabilidade nos fatores modificadores é inferior àquela aplicada à reserva provada, mas suficiente para servir como base para uma decisão sobre o desenvolvimento de um depósito mineral. Já a reserva provada é a porção economicamente lavrável de um recurso mineral medido identificada por meio de estudos

desenvolvidos com elevado grau de confiança nos fatores modificadores aplicados (ANM, 2022). Assim, no trabalho em questão, o minério *lump* é entendido diretamente como recurso provado e toda a camada do serpentinito foi trabalhada como recurso provável, pois o minério é encontrado contido nesta camada devido as associações de formação do depósito mineral.

Ao fim, o trabalho trouxe uma nova modelagem geológica para a área, reforçando a grande influência da geologia regional na área e na formação dos depósitos de cromo. Além disso, trouxe pontos cruciais para melhoria do conhecimento do depósito, como o aprimoramento das análises geoquímicas do minério e também a sugestão de áreas que possam ser sugestivas de interesse de prospecção mineral.

REFERÊNCIAS

- ANM. **Agência Nacional de Mineração**. Resolução nº 94 de 07 de fevereiro de 2022. Disponível em: <https://blog.jazida.com/resolucao-anm-no-94-de-7-de-fevereiro-de-2022/>. Acesso em 03 de mar. 2023.
- ALKMIM, F. F. **O que faz de um cráton um cráton?** O Cráton do São Francisco e as revelações almeidianas ao delimitá-lo. In: MANTESSO-NETO, V.; BARTORELLI, A.; CARNEIRO, C.D.R.; BRITO NEVES, B. B. (Org.). *Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. São Paulo: Beca, p. 17-34, 2004.
- ALMEIDA, F. F. M. **O Cráton do São Francisco**. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 7, no. 4, 349-364, 1977. ALMEIDA, F. F. M. **O Cráton do São Francisco**. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 7, n. 4, 349-364, 1977.
- ALMEIDA, H. L. DE; Cabral, E.B.; Bezerra, F. X. **Evolução deformacional de rochas do Vale do Jacurici**: preparação para estruturação de corpos cromitíferos máfico-ultramáficos. *Geologia dos Estados Unidos. Série Científica*, vol. 17, não. 2, pág. 71, 1 de agosto de 2017.
- ALVES, C. D. S. **Caracterização do maciço rochoso com uso de testemunhos de perfuração na mina Ipueira 3, Andorinha - Bahia**. Campina Grande, 2005. 140p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB, 2005.
- AVENA NETO, R. & SA, J.H.S. 1984. **Pesquisa de platinóides nos complexos máfico-ultramáficos de Campo Formoso e Vale do Rio Jacurici, Bahia**. In: CONGR. BRAS. GEOL., 33, Rio de Janeiro, 1984. Boletim de Resumos ... Rio de Janeiro, SBG, p. 240.
- BARBOSA, J. S. F. **Síntese do conhecimento sobre a evolução geotectônica das rochas metamórficas arqueanas e paleoproterozóicas do embasamento do Cráton do São Francisco na Bahia**. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 27, n. 3, 241-256, 1997.
- BARBOSA, J.S.F.; Sabaté, P. **Crosta arqueana e paleoproterozóica do Cráton do São Francisco, Bahia**, Brasil: feições geodinâmicas. *Pesquisa pré-cambriana*, v. 133, n. 1-2, pág. 1-27, 2004.
- BARBOSA, J.S.F.; Sabaté, P.; Dominguez J. M. L. **O Estado da Bahia na Plataforma Sul-Americana, suas subdivisões, critérios de empilhamento estratigráfico de coberturas de plataformas e ciclos geotectônicos**. *Geologia da Bahia: Texto Explicativo do Mapa Geológico da Milionária*: Salvador. Secretaria de Indústria, Comércio e Minas/Superintendência de Geologia e Recursos Minerais, v. 2, 39-66. 1996.
- BIONDI, João Carlos. **Processos metalogenéticos e depósitos minerais brasileiros**. - dois. Ed. Ver. E atual. Oficina de Textos. São Paulo, p.56-57, 2015.
- BITAR, Omar Yazbek et al. **Geotecnologia: tendências e desafios**. São Paulo em

Perspectiva, v. 14, p. 78-90, 2000.

BRITO NEVES, B.B.; NETO, M.C.C.; FUCK, R. A. **De Rodínia a Gondwana Ocidental: Uma abordagem do Ciclo Brasileiro-Pan Africano e da colagem orogênica.** Episódios, v. 22, n. 3, 155-166, 1999.

CAMERON, E. N. **Evolução da Zona Crítica Inferior, setor central, Complexo Bushveld oriental e seus depósitos de cromita.** Geologia Econômica, v. 75, n. 6, 845-871, 1980.

CAMPOS NETO, M. C. **Sistemas Orogrênicos do Sudoeste de Gondwana: Uma Abordagem do Ciclo Brasileiro-PanAfricano e da Colagem Orogrênica no Sudeste do Brasil.** In: CORDANI, U. G.; MILANI, E. J.; THOMAZ FILHO, A.; CAMPOS, D. A. (Org.). **Evolução Tectônica da América do Sul.** Rio de Janeiro: 31º Congresso Internacional de Geologia, p. 335-365, 2000.

CAMPOS, Pedro Henrique Alves. **Um comparativo de metodologias no planejamento de lavra: sequenciamento direto de blocos vs. planejamento tradicional.** 2017.

CARVALHO, L.M., Ramos, M. A. B.. **Geodiversidade do estado da Bahia.** 2010.

DALLA COSTA, M.M., Fernandes L., Duarte J.E.C., Recuero J.C. (coords.). **Anuário mineral estadual Minas Gerais. Anos base 2010 a 2014.** Brasília, Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), 133 p. 2017.

DARLING, Peter (Ed.). **SME mining engineering handbook.** SME, 2011.

DEL LAMA, E. A.; Cândia, M. A. F.; Szabó, G. A. J. **Petrografia e metamorfismo das encaixantes metassedimentares dos complexos máfico-ultramáficos Hospedadores de Cromititos do Vale do Jacurici, Bahia, Nordeste do Brasil.** Geologia USP, Série Científica, v. 1, n. 1, 01-15, 2001.

DEUS, P.B.; Viana, J. S. **Distrito Cromítico do Vale do Jacurici.** 32º Congresso Brasileiro de Geologia, v. 3, 44-52, 1982.

DIAS, J. R. V. P. et al. **Impressão regional de picos metamórficos de alto grau em zircões do Complexo máfico-ultramáfico Jacurici, Cráton do São Francisco, Brasil.** Revista Brasileira de Geologia, v. 52, n. 1, 2021.

EALES, H. V. **Implicações do balanço de cromo do Membro Ocidental do Complexo Bushveld.** South African Journal of Geology, v. 103, 141-150, 2000.

FERNANDES, Jorge Augusto Basilio. **Krigagem com deriva externa aplicada à avaliação de recursos minerais de calcário e de minério laterítico.** 2009. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

FERREIRA-FILHO, C. F. **Cromititos associados a complexos lamelares no Brasil:**

testando modelos genéticos "one-fit-all". Anais da Academia Brasileira de Ciências, v. 74, n. 3, 554-554, 2002.

FIGUEIREDO, A. N. **Depósitos de cromita de Goiás e Campo Formoso (BA) – diagnóstico e análise comparativa.** Revista Brasileira de Geologia, v. 7, n. 1, pág. 73-83, 1977.

FRIEDRICH, B.M.; Marques, J.C; Olivo, G. R.; Frantz, J.C.; Alegria, B.; Queiroz, J. A. Q.; **Petrogênese da camada maciça de cromita do Complexo Jacurici, Brasil: evidências de inclusões em cromita.** Mineralium Deposita, v. 55, n. 6, 1105-1126, 2019.

HUSTRULID, W. A., & Kuchta, M. (2013). **Open Pit Mine Planning and Design.** (2º ed., Vol. 1). Londres: FUNDAMENTALS.

IRVINE, T. N. **Origem das camadas de cromitito na intrusão Muskox e outras intrusões estratiformes: uma nova interpretação.** Geologia, v. 5, n. 5, 273, 1977.

JACKSON, E. D. **Texturas primárias e associações minerais na zona ultramáfica do Complexo Stillwater, Montana.** U.S. Geological Survey, Professional Papers 358, 106. 1961.

JACKSON, E. D. **Variação estratigráfica e lateral da composição de cromita no Complexo Stillwater.** Documento Especial da Sociedade Mineralógica da América, v. 1, 46-54. 1963.

JAKOB, Alberto Augusto Eichman; YOUNG, Andrea Ferraz. **O uso de métodos de interpolação espacial de dados nas análises sociodemográficas.** Anais, p. 1-22, 2016.

KOSIN, M.; De Mello, R. C.; De Souza, J. D.; De Oliveira, A. P.; Carvalho, M.J.; Leite, C. M. **Geologia do trecho norte do orógeno Itabuna-Salvador-Curaçá e guia turístico.** Revista Brasileira de Geociências, v. 33, n. 1, 15–26, 2003.

LIMA TM; Neves C.A.R. (coordenadas). **Sumário Mineral 2015.** Brasília, Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), v. 35, 135 p. ISSN: 01012053. 2016.

LIMA, J. M. G. Produto 12: minério de cromo. **Relatório Técnico 21: Perfil da Mineração de Cromo.** Contrato nº 48000.003155/2007-17: desenvolvimento de estudos para a elaboração do plano duodecenal (2010 - 2030) de geologia, mineração e transformação mineral. Banco Internacional para Reconstrução e Desenvolvimento – BIRD. agosto de 2009.

LIPIN, B. R. **Aumentos de pressão, a formação de veios de cromita e o desenvolvimento da série ultramáfica no Complexo Stillwater, Montana.** Journal of Petrology, v. 34, n. 5, 955-976, 1993.

LOURENÇO, Roberto Wagner; LANDIM, Paulo Milton Barbosa. **Mapeamento de áreas de risco à saúde pública por meio de métodos geoestatísticos.** Cadernos de Saúde

Pública, v. 21, p. 150-160, 2005.

MACHADO N., Noce C. M., Ladeira E. A., Belo de Oliveira O. A. **U-Pb geocronologia de magmatismo arqueano e metamorfismo proterozóico no Quadrilátero Ferrífero, sul do Cráton do São Francisco, Brasil.** Boletim Americano da Sociedade Geológica, v. 104, n. 9, 1221-1227, 1992.

MALIOTIS, G. **Usos e mercados do cromo, publicado pela Industrial Minerals Information Ltd, Worcester, Inglaterra, p. 1-161, 1999.**

MARINHO, M. M., Rocha, G. F., Deus, P. B., Viana, J. S. **Geologia e potencial cromítico do Vale do Jacurici-Bahia.** 34º Congresso Brasileiro de Geologia, 2074-2088, 1986.

MARQUES, J.C.; Filho, C. F. F. **A jazida de cromita da soleira Ipueira-Medrado, Cráton São Francisco, Bahia, Brasil.** Geologia Econômica, v. 98, n. 1, 87-108, 2003.

MELLO, C.H. de M.P.; DURÃO, G. VIANA, J. dos S.; CARVALHO, C.J.C. 1986. **Depósitos de cromitas das fazendas Medrado e Ipueira, Município de Senhor do Bonfim, Bahia.** In: Principais depósitos minerais do Brasil. Brasília, DNPM/CVRD p. 213-248.

MOORES, E. M. **Uma história pessoal do conceito de ofiolito.** Documentos especiais Geological Society of America, 17-30, 2003.

NOCE, C. M.; Machado, N.; Teixeira, W. **U-Pb Geocronologia de gnaisses e granitóides no Quadrilátero Ferrífero (sul do Cráton do São Francisco): restrições de idade para magmatismo e metamorfismo arqueano e paleoproterozóico.** Revista Brasileira de Geociências, v. 28, n. 1, 95-102, 1998.

OLIVEIRA, R.C.L.M; Neves, J.P; Pereira, L.H.M; MACÊDO, L. L. Mota, E. L.; Santiago, R. C. Teixeira, L. R. **Folha SC.24-Y-B-II Andorinha: carta geológica - escala 1:100.000.** Salvador: CPRM, 1 mapa, color. Escala 1:100.000, 2016.

PEREIRA, Gabrielle Alberta et al. **Lógica fuzzy aplicada a elaboração de carta geotécnica de aptidão à urbanização da área de expansão da UNICAMP-Campinas, SP.** Geosciences, Geociências, v. 40, n. 04, p. 1137-1145, 2021.

RENARD, Philippe; COURRIOUX, Gabriel. **Three-dimensional geometric modeling of a faulted domain: The Soultz Horst example (Alsace, France).** Computação & Geociências, v. 20, n. 9, p. 1379-1390, 1994.

SAMPAIO, J.A.; ANDRADE, M. C.; PAIVA, PAIVA, P. R. P. **Chromita.** In: Adão Benvindo da Luz e Fernando Freitas Lins. (Org.). Rochas e Minerais Industriais 2ª ed. Rio de Janeiro: CETEM, p. 403-426, 2005.

SILVA, Alessandro Henrique Medeiros. **Modelagem geológica e estocástica da porção NE da Mina de Morro do Ouro, Paracatu (MG).** 2001.

SILVA, Thyago de Oliveira da. **Quantificação da incerteza volumétrica na modelagem geológica**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 2016

SILVEIRA, C.J.S.; Frantz, J.C.; Marques, J.C.; Queiroz, W.J.A.; Roos, S.; Peixoto, V. M. **Geocronologia U-Pb em zircônio de rochas intrusivas e embasamento na região do Vale do Jacurici, Cráton do São Francisco, Bahia**. Revista Brasileira de Geologia, v. 45, no. 3, 453–474, 2015.

STOWE, C. W. **Composições e configurações tectônicas de depósitos de cromita ao longo do tempo**. Geologia Econômica, v. 89, n. 3, 528–546, 1994.

TEIXEIRA W.; Sabaté J.P.; Barbosa J.; Noce C.M.; Carneiro A. M. **Evolução tectônica Arqueana e Paleoproterozóica do Cráton do São Francisco**. In: CORDANI, U. G.; MILANI, E. J.; THOMAZ FILHO, A.; CAMPOS, D. A. (Org.). *Evolução Tectônica da América do Sul*. Rio de Janeiro: 31º Congresso Internacional de Geologia, p. 101-138, 2000.

THAYER, T.P.; Jackson, E. D. **Uma classificação de rochas ígneas por sua história de cristalização e colocação**. U.S. Geology, 79-83, 1972.

VOORDOUW, R.; Gutzmer, J.; Beukes, N. J. **Origem intrusiva para camadas de cromitito estratiforme do Grupo Superior (UG1, UG2) na área do Rio Dwaars, Complexo Bushveld, África do Sul**. Mineralogia e Petrologia, v. 97, n. 1-2, 75-94, 2009.

YAMAMOTO, Jorge Kazuo; LANDIM, Paulo Milton Barbosa. **Geoestatística: conceitos e aplicações**. 2013.



ISSN: 2447-3359

REVISTA DE GEOCIÊNCIAS DO NORDESTE

Northeast Geosciences Journal

v. 9, nº 1 (2023)

<https://doi.org/10.21680/2447-3359.2023v9n1ID28165>

Chromitiferous Deposits of the Jacurici Valley: A Bibliographic Review

Iago Silva Rebouças¹; Sérgio Roberto Bacelar Hühn²; Joyce Shantala Fernandes de Oliveira Sousa³; Cláudio Ângeloda Silva Neto⁴; Mateus de Paula Miranda⁵; Antonio Daniel da Silva Silveira⁶

¹ Federal University of Ceará-UFC, Science Center/Geology, Fortaleza/CE, Brazil. Email: iago.reboucas@hotmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2294-016X>

² Federal University of Ceará-UFC, Science Center/Geology, Fortaleza/CE, Brazil. Email: sergio.bacelar@ufc.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7711-1612>

³ Federal University of Ceará-UFC, Science Center/Geology, Fortaleza/CE, Brazil. Email: joyceshantala@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7833-2748>

⁴ Federal University of Ceará-UFC, Science Center/Geology, Fortaleza/CE, Brazil. Email: claudioasn@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6749-9438>

⁵ Institute of Geosciences, University of Campinas, UNICAMP, Campinas/SP, Brazil. Email: m264744@dac.unicamp.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5131-2109>

⁶ Federal University of Ceará-UFC, Science Center/Geology, Fortaleza/CE, Brazil. Email: danielsilver273@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8213-777X>

Abstract: Chromite was widely employed in the industry for many years as a component in manufacturing paint pigments. The world's most significant chromite ore resources are in South Africa, Kazakhstan, and India (90% of the reserves). Brazil is home to 0.13 percent of the world's chromium deposit reserves. The Jacurici Valley-BA national mafic-ultramafic complex possesses the most specimens in the territory. Although some works aimed at characterizing the geological existence of Jacurici Valley and the Ipeueira-Medrado segment, a low scientific production is identified in other branches of geosciences. This work aims to develop the first systematic literature review of chromitic deposits in these regions. This work will promote an information base that will contribute to the direction of future research lines in the area. The bibliographic research was carried out systematically. We used the following works as a foundation: 24 articles relevant to the topic, 03 books, 03 reports, and an expanded abstract obtained from the Google Scholar digital platform. Expanding geoscience studies focusing on more specialized fields would aid the broader characterization of the region's chromium ore. As a result, fresh investigations are continually being conducted that will expand the scope of the mineral study.

Keywords: Chromitite Deposits; Mines of Ipeueira-Medrado; Mafic-ultramafic Deposits.

Resumo: Por muitos anos, a cromita foi bastante utilizada na indústria como componente para produção de pigmentos para tintas. Os principais depósitos minerais de cromita são encontrados na África do Sul, Cazaquistão e Índia (90% das reservas). O Brasil detém 0,13% das reservas mundiais de depósito de cromo. Os maiores exemplares em território nacional são encontrados no complexo máfico-ultramáfico do Vale do Jacurici-BA. Embora exista alguns trabalhos com finalidade da caracterização geológica do Vale do Jacurici e do segmento Ipeueira-Medrado, é identificado uma baixa produção científica em outros ramos das geociências. O objetivo do trabalho é o desenvolvimento da primeira revisão bibliográfica sistemática dos depósitos cromitíferos nestas regiões. Este trabalho promoverá uma base de informações que contribuirão com o direcionamento de futuras linhas pesquisas na área. As pesquisas bibliográficas foram desenvolvidas de modo sistemático, onde os trabalhos usados como base foram obtidas na plataforma digital Google Acadêmico: 24 artigos aplicáveis à temática em questão, 03 livros, 03 relatórios e um resumo expandido. O desenvolvimento de pesquisas focadas em ramos mais específicos em geociências, auxiliariam na caracterização mais ampla em torno do minério de cromo da região. Sendo assim existem estudos ainda não explorados que abrirão novos horizontes para a pesquisa mineral.

Palavras-chave: Depósitos de Cromita; Minas de Ipeueira-Medrado; Máfico-

1. Introduction

Mineral mining, both metallic and nonmetallic, has long played an essential role in the national economy (DALLA COSTA *et al.*, 2017). As the metallurgical sector evolved during the twentieth century, chromite and other minerals became essential commodities, primarily producing stainless steel (MALIOTIS, 1999). Metal alloys are the most common application for chromium, which is widely used in the manufacture of everyday products. In this context, the Jacurici Valley complex in Bahia has the world's largest chromite reserves. While there have been studies in this area on chromium mineralization that focus on the deposit's properties, there have not been enough complementary studies to improve characterization and generate new research strands.

Chromite ($\text{FeO}\cdot\text{Cr}_2\text{O}_3$) is a mineral that produces chromium ore, which is the fifth most commonly used metallic element in industry after iron, manganese, aluminum, and copper (SAMPAIO *et al.*, 2005). It is one of the world's most important industrial minerals in metallic and nonmetallic applications. It is widely used in metallurgy (80% of global use), refractories (1%), and the chemical industry (8%) (ALMEIDA *et al.*, 2017; SAMPAIO *et al.*, 2005). Chromium (Cr) mineralizations are almost exclusively found in primary and ultrabasic plutonic igneous rocks and are members of the orthomagmatic ores metal family.

South Africa, Kazakhstan, and India have the world's largest chromite reserves (more than 90% of total reserves) and are the metal's most essential production poles (DALLA COSTA *et al.*, 2017). According to the most recent Brazilian Mineral Summary published by the Departamento Nacional de Pesquisa Mineral (National Department of Mineral Research) in 2014, Brazil is the only chromium producer on the American continent, with 0.13% of global reserves, equivalent to 1.9 million tons of mineable reserves and 570 thousand tons of Cr_2O_3 contained. When mineable and measured reserves are added together, 2.66 Mt of contained metal is accounted for, with the most significant resources in the states of Bahia (33,53%), Amapá (32%), and Minas Gerais (20%) (LIMA; NEVES, 2016). In 2014, the country produced 716,674.87 tons of compact, concentrated, granulated chromite and chromite sand, equaling 244,622.46 tons of contained Cr_2O_3 . Geographically, 93.5% of Brazilian reserves are located in the state of Bahia, within the territorial limits of the municipalities of Campo Formoso, Andorinha, Santa Luza e Piritiba (LIMA, 2009). Bahia alone accounted for 70,80 % of national production or 507,423.87 t of Cr_2O_3 with a Cr_2O_3 content of 39% (LIMA and NEVES, 2016). In the state of Bahia, specifically in the deposits of the Campo Formoso district, there are four types of chromium mineralization. The first type is configured as metallurgical grade ore, called lump type.

This ore occurs in tabular layers ranging from centimeters to two meters in thickness and contents ranging from 30 to 48% of Cr_2O_3 . The stratified ore, also called phytate, presents an alternation of centrimetric sheets of chromite and serpentinite, and presents contents ranging from 15 to 30% of Cr_2O_3 . The disseminated type, presents a variation of content between 10 to 20% of Cr_2O_3 and occurs associated with the phytatic type or isolated bodies. The last one is the friable, where it is usually found associated with clay and disseminated chromite, with variations of contents identical to the disseminated and stratified types. The latter type originates from disseminated and stratified mining (LIMA, 2009).

The Jacurici Valley mafic-ultramafic complex is the primary chromium mineralization in the national area (FIGUEIREDO, 1977). It can be found in the São Francisco Craton, located northeast of the state of Bahia (ALKIMIM, 2004). The Serrinha Block borders the chromitic district. At the end of the Transamazonian Cycle during the Archean, the block was consolidated and was limited by the Sergipe Fold Belt and the Salvador-Curaçá Belt (BARBOSA, 1997). To the district's west are the Serra de Itiba syenite and rocks with a high metamorphic grade connected to the ductile shear zone of the northern part of the Itabuna Belt (DE ALMEIDA, 2017). The rocks of Jacurici Valley were subjected to solid deformations and metamorphism during the Paleoproterozoic due to the collision of the crustal Blocks of Serrinha, Gavião, and Jequié (KOSIN *et al.*, 2003). The Jacurici Valley Complex contains 22 mafic-ultramafic intrusive rocks contained in granulites and gneisses in the geological environment of the Serrinha Block. The Ipueira and Medrado mines are two of the most important in terms of the financial requirements of the chromium deposits among these already recognized bodies (FRIEDERICH, 2019).

Notables institutional information and online databases in the minas de Ipueira-Medrado region bring good works on local surface geology and conceptions of the mineral deposit's general characteristics. Aerogeophysics (DIAS, 2021), geological mapping (OLIVEIRA, 2016), structural geology (DE ALMEIDA, 2017), and petrological and lithochemical characterization are some geological research publications (MARQUES *et al.*, 2003). However, several new research reports may study the mineral bodies, such as geostatistical data analysis from mineral source studies, geophysical studies of electroresistivity for dimensioning the mineral body and applying Remote Sensing techniques to more recent data for potentially promising areas.

The primary goal of this research is to conduct the first systematic review of the literature on the various types and properties of chromitic deposits in Jacurici Valley. The research identified gaps that allowed for a state-of-the-art investigation of the chromium deposits in the Jacurici Valley. Furthermore, the study will create a database of information on the region, which will help guide future studies.

2. Material and Methods

2.1 Location of the study area

The research area is in the municipality of Andorinhas, in the geographic region of Piemonte Norte do Itapicuru, in the state of Bahia's central-north region. This municipality borders the municipalities of Senhor do Bonfim, Monte Santo, Jaguarari, Itiba, and Uauá and is located 450 kilometers from Salvador, BA. The mafic-ultramafic complex of Jacurici Valley, which is part of the São Francisco Craton, is prominent in the area (Figure 1).

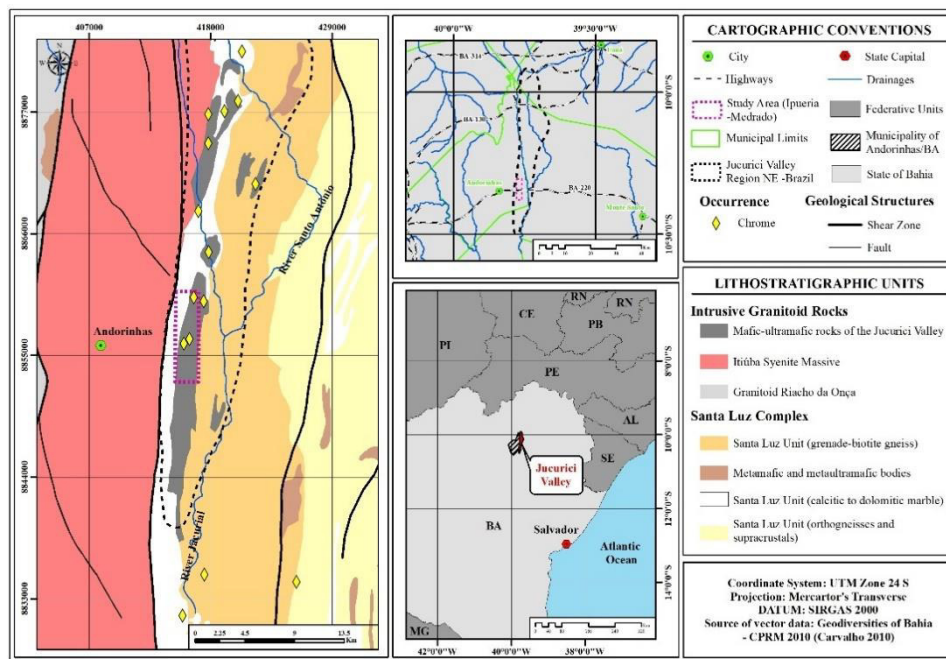


Figure 1 – Study area location map and lithostratigraphic of a portion of the Jacurici Valley, with emphasis on the Ipueira-Medrado study area region
Source: author (2022)

2.2 Regional Geology and Chrome Deposits Metallogeny

In regional geological evolution, the cratons of the South American and African continents are considered more stable inner portions of the plates. They merged these parts after more minor cratonic segment collisions (BRITO NEVES *et al.*, 1999; CAMPOS NETO, 2000). Plate margins and aggregated portions became part of the Brasiliano-Pan-African orogenic belts (ALKMIM, 2004).

The Brasília belts delimit the São Francisco Craton to the south and west, the Rio Preto belt to the northwest, the Riacho do Pontal and Sergipana belts to the north, and the Araçuaí belt to the southeast (ALMEIDA, 1977). According to Alkmim (2004), the center of the craton contains Neoproterozoic covers of the Rio Pardo and Sergipe Belt. Precambrian and Phanerozoic units cover its interior, comprising three critical morphotectonic units: the São Francisco Basin, the Parnamirim Aulacogen, and much of the Recôncavo-Tucano-Jatobá Rift (ALKMIM, 2004).

The Mineiro Belt is a basement section exposed in the south of the Craton during the Transamazonian Event, and it was subjected to deformation and heat activity (NOCE *et al.* 1998; MACHADO *et al.* 1992). These terrains comprise a base metamorphic complex and supracrustal rocks from the Rio das Velhas, Minas, and Itacolomi Supergroups. Granites from the Archean and Paleoproterozoic periods are also present (ALKMIM, 2004).

North of the Craton, a piece of the Paleoproterozoic Orogen Fragment can be found (BARBOSA and DOMINGUEZ, 1996; TEIXEIRA *et al.*, 2000; BARBOSA and SABATÉ, 2001; ALKMIN, 2004). This section is divided into four major lithotectonic components, each with its own genetic composition and habitat (BARBOSA and DOMINGUEZ, 1996; TEIXEIRA *et al.*, 2000; BARBOSA and SABATÉ, 2001). We summarize the four Archean lands in Table 1.

Table 1 – The Main Lithotectonic Components of the São Francisco Craton's Northern Portion.

Lithotectonic Components	
Lands	Features

Gavião Block	It comprises an Archean core that has been reworked on the edges. There are older rocks from the São Francisco Craton in this setting. Greenstone belt sequences, TTG plots with a 3.4 Ga age, two generations of granitoid with 3.2–3.1 Ga and another with 2.7 Ga, and TTG plots with a 3.4 Ga age. The amphibolite facies has metamorphosed all the rocks in this group.
Jequié Block	Most of the structure comprises 2.9 Ga migmatites and 2.7 Ga granitoid. It exhibits extreme deformation and Transbrasilian metamorphism under granulite facies settings. Metasediments and rudimentary metavolcanic can fill the block's rifts in this part.
Serrinha Block	In retro-arc basins, significant metamorphism marks it and contains Paleoproterozoic greenstone belt sequences covering part of the basement. The basement of the block comprises 2.9 Ga granites and tonalites.
Itabuna-Salvador-Curaça Belt	The terrain is made up of tonalites, trondhjemitites, and metasediments. Its distinguishing characteristic is the Neoproterozoic/Paleoproterozoic magmatic arc setting. Because of the Paleoproterozoic convergence condition, metamorphism and deformation in the granulite facies can be seen. Shoshonitic rocks have been found.

Source: author (2022).

2.2.1 Mineralogy and Metallogeny of chromium deposits

We can find chromium in nature as chromite and magnesium-chromite, both members of the spinel group, which includes minerals that contain magnesium, chromium, iron, and aluminum in their structure (SAMPAIO *et al.*, 2005). Chromite is the only economically viable ore mineral among the chromium minerals. Thus, this element is distinguished in the most important minerals: chromite (FeCr_2O_4), the aluminochromite [$\text{Fe}(\text{CrAl})_2\text{O}_4$], magnesiochromite ($\text{Mg,FeCr}_2\text{O}_4$) and chromopyrite [$(\text{Mg,Fe})(\text{Cr,Al})_2\text{O}_4$] (LIMA, 2009).

According to Sampaio *et al.* (2005), chromite has a theoretical composition of 68% Cr_2O_3 and 32% FeO , although these quantities are never encountered in nature because of impurity implications. Depending on the Cr_2O_3 content and the Cr/Fe ratio, chromite can be classified as metallurgical, chemical or refractory (LIMA, 2009). In crystallographic terms, Sampaio *et al.* (2005) characterize chromite as an oxide with the structure of spinels, with the crystallographic formula XY_2O_4 .

The genesis of chromite deposits is because of mineral crystallization during the cooling of magma, with chromite as the only cumulus phase (FERREIRA FILHO, 2002; SAMPAIO *et al.*, 2005). The chromite deposits are formed by partially melting the peridotitic upper mantle, while the magmas are created by partially melting the peridotitic upper mantle. For the system to enter the chromite stability field, according to Ferreira Filho (2002), specific phase relationships must exist for chromite deposition in the magma chamber.

We can divide the deposits into two classes based on their development: compact (stratiform) and podiform chromite (STOWE, 1994). Kropschot and Doebrich (2010) proposed a third group of chromitites associated with Alaskan-Uralian zoned mafic-ultramafic complexes (FRIEDERICH, 2018).

The stratiform are tabular chromitic deposits in igneous intrusions beds and account for a significant portion of the world's known chromium reserves, accounting for 90% of the total (SAMPAIO *et al.*, 2005). These shield-shaped intrusions connect with layered mafic-ultramafic intrusions and are older than 1.9 billion years (THAYER and JACKSON, 1972; SAMPAIO *et al.*, 2005). Intrusions of mafic-ultramafic magma link to cratonic terrains and even rifting episodes. Dunites, peridotites, pyroxenites, and gabbros are among the rocks that make up this group. In the mafic zone, disseminated and massive mineralization may include up to 90% or more chromite and is associated with lower sections of intrusions (THAYER and JACKSON, 1972). Generally, the ore is found more friable (LIMA, 2009). The Mafic-Ultramafic Complex at Jacurici Valley in the Brazilian state of Bahia is an excellent example of this type of deposit. Witwatersrand and Bushveld Complexes in South Africa are the most outstanding examples of these genetic models.

The second type of chromitic deposit is the podiform deposit. These deposits originate around the oceanic lithosphere's accretionary tectonic plate borders. Obduction mechanisms that absorb them into the continental margins keep them on the continent (MOORES, 2003). We can find these in the same mafic-ultramafic rocks as stratiform rocks, but the formation structure is different. The Wilson Cycle goes through several stages of creation. Estes depósitos, em comparação com os estratiformes são de portes menores, mas com teores superiores de cromo e relações Cr/Fe. Os minérios deste tipo de depósitos, geralmente são do tipo compacto (*lump*) (LIMA, 2009).

The deep sea sedimentary association at the top, basalts with tholeiitic pillow characteristics, and swarms of basic dykes in the sheet in the most central regions are typical elements of this mineralization model. The mafic complex of gabbros is just below the most superficial section, and the ultramafic complex (harzburgite, lherzolite, and dunite) is near the base (MOORES, 2003). New magmatic inflows from the same intrusive processes fracture the mineralizations in subsequent magmatic events or pulses known as

autoliths, which occur between the mafic and ultra-mafic zones. Chromite crystallizes in the magma chamber, and the crystals' remobilization divides into two groups in complexes-layered: on-stage and offstage (Jackson, 1961; 1963; Eales, 2000; Friedrich, 2018).

Jackson (1961; 1963) suggested the first concept, On-Stage, based on observations of the chromititic strata of the Stillwater Complex in the United States. In this scenario, Jackson (1963) determined that chromite crystals form at the magma chamber's base. As a result, magma settles relatively still and without lateral transit, resulting in a cotectic displacement caused by mixing the most advanced resident magma with a primitive one contaminated by crust (IRVINE, 1977).

Jackson produced important papers in 1963 on lateral variations in the oxidation ratio ($\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}+\text{Fe}^{3+}$) and fluctuations in the sum of total iron ($\text{Fe}^{2+} + \text{Fe}^{3+}$) between layers (FRIEDERICH, 2018). He linked the differences to a lateral gradient in the magma's $f\text{O}_2$ during the Ultramafic Zone's development. The change is thus tied to the cell's convection pattern, the placements of the feeder ducts or even the extraction of water from the sediments intruded along the intrusion's edges (JACKSON, 1963).

According to Cameron (1980), chromites in chambers crystallize as a function of overall pressure variations. Chromite can only crystallize before pyroxene if the initial Cr_2O_3 concentration is over 0.2% by mass (Friederich, 2018). In this situation, the magma would be close to the chromite precipitation limit, causing the system to be moved to the chromite stability field due to pressure fluctuations. Other authors have postulated changes in total pressure caused by CO_2 bubbles, an increase in the magma chamber, and a subsequent reduction or magmatic escape as a displacement agent toward the olivine-chromite border (LIPIN, 1993).

The offstage model proposed by Eales (2000) states that, besides the magma chamber that formed the Bushveld Complex, a second chamber containing a magma richer in magnesian composition and richer in Cr would be present where fractional crystallization processes and gravitational settlement would take place (FRIEDERICH, 2018). According to Friederich (2018), a magmatic injection containing up to 3% chromite microphenocrysts was introduced to the previously crystallized Bushveld chamber, enriching in Cr via intercumulus liquid escapes from this second chamber. In addition, Voordouw (2009) presented a similar concept in which it would generate chromite along the chamber's feeder ducts because of a mixture of magmas flowing through the space and accumulating in structural traps (VOORDOUW, 2009). According to Friederich (2018), chromite crystals gathered in conduits would be remobilized and injected into the magma chamber as sills via a chromite mud containing roughly 53 to 62% chromite (Figure 2). Processing a 2.5 km thick magma column and perfect gravitational separation between chromite and olivine would be required to create a one m-thick chromitite layer.

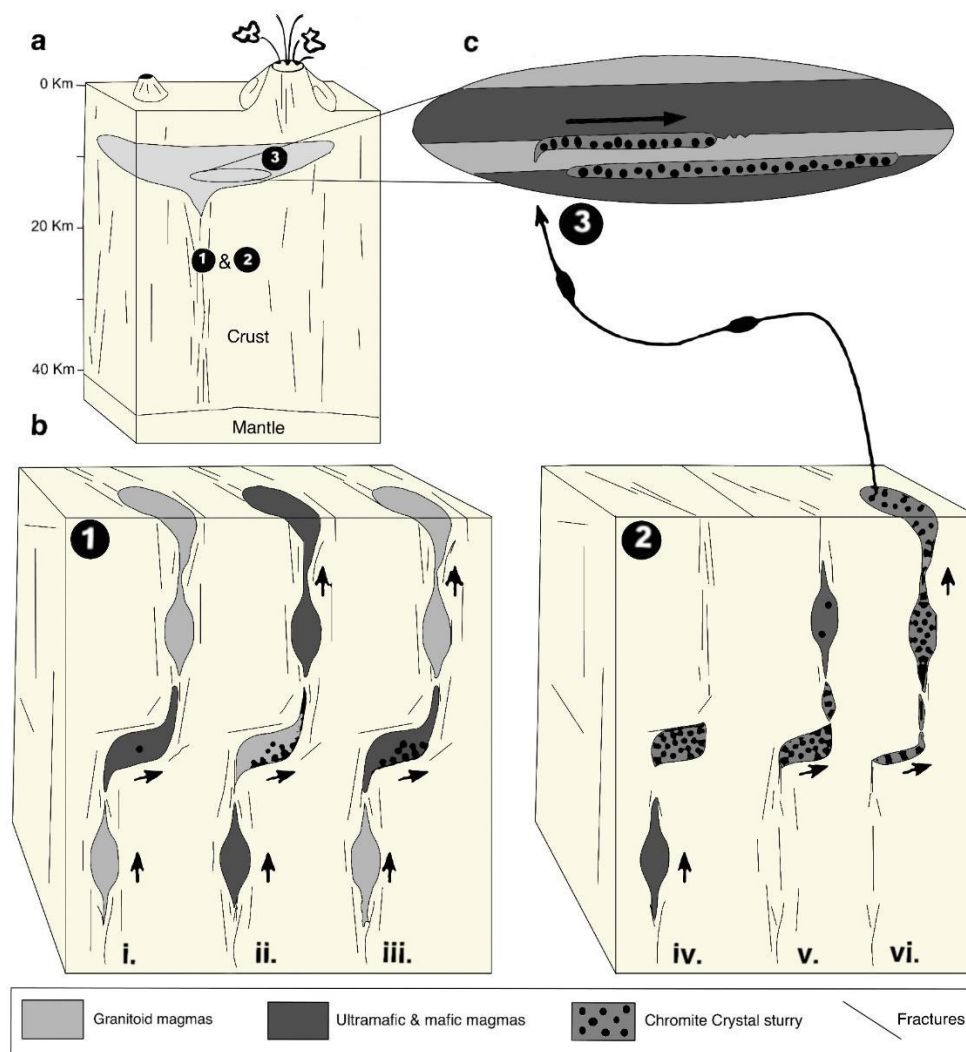


Figure 2 - Model illustrating an intrusive origin for chromite layers. (a) And Earth crust prizes, the approximate locations of the three stages. (b) Steps in a chromium mud structural structure 1–3: (1) Chromium mud structural steps; (2) remobilization of the chromite-rich mud and ascent through the conduit; (3) placement of chromite mud along with the lithological contacts in the Rustenburg Layered Suite.

Source: Modified from Voordouw (2009).

2.2 Methods

The systematic review was based on studies on public and private agency websites such as books, articles, theses, dissertations, and publications. These platforms provide data on the characterization of chromite deposits in the national and local contexts of the Jacurici Valley/BA chromitic complex. We found the sources by searching Google Scholar for the terms "Chromite Deposit" and "Jacurici," which yielded 42 results. Because of the approach to the themes covered in the evaluation, we reduced it to 24 appropriate pieces after the screening: three volumes, three reports, and an expanded abstract round up the integrated works.

3. Results and Discussions

3.1 Chromitic districts of the Jacurici Valley

Three Neoproterozoic mobile belts (Riacho do Pontal, Rio Preto, Sergipana, Araçua, and Brazilian Belt) restrict the mafic-ultramafic complex of Jacurici Valley, which is located northeast of the state of Bahia and is an integral part of the São Francisco Craton. The ages of such a complex range from 2,085 to 5 Ma, which is equivalent to the age of the region's metamorphic peak (BARBOSA *et al.*, 1996; FRIEDERICH, 2019).

In this complex, several mafic-ultramafic intrusive masses are interbedded with granulites and gneisses rocks (BARBOSA *et al.* 1996). Granodiorite to tonalitic leucocratic gneisses with amphibolite intercalations, banded iron formations, olivine-marbles, diopside-rich calc-silicates, quartzites, grenadier gneisses, and metacherts are the most common lithotypes (MARINHO, 1986). Silveira *et al.* (2015) hypothesized meta-gabbro-norite as the origin of the amphibolic bodies formerly thought to be sedimentary. In contrast, Almeida *et al.* (2017) suggested cogenetic intrusions to the Jacurici Complex.

The chromitic bodies in this complex are found in the Archean contexts at the Serrinha block. The mafic-ultramafic intrusions that occur in the Jacurici Valley complex, according to Dias *et al.* (2021), cover a region of around 70 km in length and 20 km in width, with most of them orientated N-S.

According to Alves (2005), 14 chromitic bodies were discovered in the valley in 2005, with names ranging from north to south: Logradouro do Juvenal, Várzea do Macaco I, Várzea do Macaco II, and Várzea/Teiú (municipality of Uauá); Monte Alegre, Cemitério, Riacho I, Riacho II, Barra, Algodões, and Lajedo (municipality of Queimadas). Medrados, Pindoba, Ipueira/Socó and Pedra of Dórea (municipality of Andorinha); Laje Nova (municipality of Cansanção); and finally, Barreiro and Pau Ferro (municipality of Queimadas). Friedrich (2019) claims that 22 mafic-ultramafic entities have been cataloged in a more recent investigation.

During the Paleoproterozoic, the Jacurici Valley complex rocks suffered an intense deformation and metamorphism events associated with the Serrinha, Gavião, and Jequié block collisions (BARBOSA and SABATÉ, 2004). The chromitic deposits of the Jacurici complex are elongated and oriented parallel to the regional foliation, with an interruption in continuity because of tectonic activity (MARQUES and CESAR, 2003).

According to Marinho (1986), three deformational events ruled over the terrains of the region during the formation of the deposits forming the isocline and transposed folds, closed folds, and lineation of foliations in the NNE and NNW directions. High metamorphic grades (amphibolites) affected these rocks, according to Del Lama (2001). Post-peak metamorphic metasomatic took place, producing serpentinization and phlogopitization processes.

In Brazil, there are other chromitic deposits with different evolution models but of great importance for the genetic knowledge of these deposits, namely the Bacuri Complex (Amapá) and Niquelândia Complex (Goiás). In addition, the two complexes, together with the Ipueira-Medrado complex, have a distinct igneous stratigraphy, further strengthening their uniqueness because of the internal formation environment (FERREIRA FILHO, 2002).

3.1.1 Ipueira-Medrado Chromite Complex

The Medrado and Ipueira mine is in the chromitic district of Jacurici Valley, on the western edge of the Serrinha Block, bordering the Salvador-Curaçá Belt, and in it, there are many economic deposits and several occurrences of chromite hosted in mafic-ultramafic rocks (ALMEIDA *et al.* 2017; BARBOSA *et al.*, 1996).

The chromium mines are structurally found in a mafic-ultramafic sill, which hosts the largest chromite deposit in Brazil. The geological body is described as an elongated form, 7 km long and 300 m thick, with a continuous layer of chromitite 5 to 8 meters thick, mineralized within the ultramafic zone (MARQUES; FERREIRA FILHO, 2003). Some authors also mention that the body presents a strong differentiation and stratification, originating from primitive magmatism and crustal contamination (DEUS and VIANA 1982).

In the geological bodies of the Medrado and Ipueira mines, the rocks are interspersed with gneiss rocks and metasedimentary rocks of high metamorphic grade. The lithotypes in the mine area are migmatized banded gneisses, granulites, metacherts, quartzites, diopsites, and olivine-marbles (ALMEIDA *et al.*, 2017). The sill in the Ipueira mine, which corresponds to the extension of the Medrado sill (east flank), presents lithotypes with chemical metasedimentary sequences that include serpentine, marble, diopside, and strictly metacherts (ALVES, 2005).

The chromitic deposit is divided into three zones (Figure 3) using the following stratigraphic sill stacking: marginal (5 to 20 m thick), ultramafic (up to 250 m thick; the layer is subdivided into upper and lower), and mafic (approximately 30 m thick) (MARQUES and FERREIRA FILHO, 2003).

According to Deus and Viana (1982), the olivines and pyroxenes in these deposits show shifts in composition, with more Mg-rich minerals towards the top of the deposit and more Fe-rich minerals at the bottom. This situation shows possible recent magmatic mixtures injected with the resident magma through

convective flow during magma cooling. The Ipueira-Medrado sill divides into seven strata units, according to Marques and Ferreira Filho (2003), since it is formed of dunites, pyroxenites, and harzburgites.

Marques and Ferreira Filho (2017) published stratigraphic correlations between the chromitic layers of Ipueira and Medrado among themselves and between Monte Alegre Sul and Várzea do Macaco through the divisions suggested for the Jacurici complex (Figure 3).

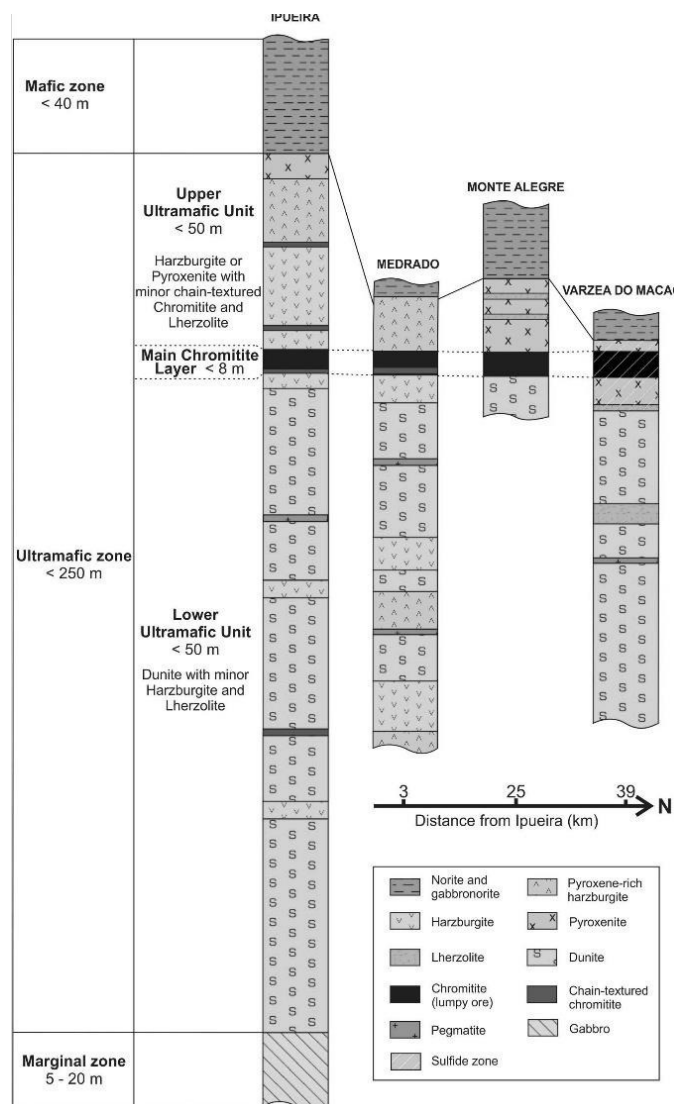


Figure 3 - Representative sections of the Ipueira, Medrado, Monte Alegre Sul, and Várzea do Macaco segments, seeking to illustrate the stratigraphic correlation and divisions for the Jacurici complex.

Source: Partially adapted from Marques and Ferreira Filho (2003).

Marques and Ferreira Filho (2003) describe that the Ipueira-Medrado deposits were formed in oneness; however, through shearing processes, the original body was divided into two groups that conserved similar lithological and structural characteristics.

Regionally, the rocks underwent intense metamorphism events (high metamorphic grade) and deformation, with minimum temperatures of the amphibolite facies (ALMEIDA *et al.*, 2017). Alves (2005) states that the elongation and discontinuity result mainly from a robust east-west compression caused by bending and transpositions in the north-south direction.

Almeida *et al.* (2017) explain that the evolution of the mafic-ultramafic chromitic bodies occurred similarly to the gneissic host rock. According to Almeida *et al.* (2017), these configurations of structural controls allowed the development of mine-scale bodies (thickness between 7 and 8 m) on both sides of the fold. The chromite layers repetition may be related to thrust shear zones identified both regionally and at a local scale.

Because of the constraints in the structure's formation, the chromitic levels also occurred in forms of bodies and are parallelized with the hinge line of the synformal folds. The Medrado synform Fold is normal, with an axial surface dipping from 75° to 90°, with a weak slope on its axis to the southwest (ALMEIDA *et al.*, 2017). The Ipueira fold configures as a reverse synform, in which both flanks dip to the east with a southwesterly slope of 10 to 15° (ALMEIDA *et al.*, 2017).

In general terms, the Ipueira-Medrado chromitic deposits are correlated with models of the Busheveld Complex (BIONDE, 2015). This correlation is motivated by its genetic origin, structuring in the magma chamber and formation environment. A strong argument that supports the traits that approximate the two models (Ipueira-Medrado with Busheveld) is the presence of the formation of nickel deposits associated with mafic-ultramafic bodies. Nickel deposits, similar to chromium, are generated during processes of magmatic segregation and are lodged in the lower portion of the chamber. In geotectonic terms, another strong similarity between both complexes is their origin of formation, where both are correlated to Precambrian cratonic areas.

When approached from the perspective of extraction through mining activities, the Ipueira-Medrado deposits are subdivided into three segments: Medrado, Ipueira II, and Ipueira Sul (Figure 4) (MARQUES; FERREIRA FILHO, 2003). The ore in these mines is hosted in serpentinites, where they can vary in disseminated or massive occurrences, which, according to Figueiredo (1977), contents can reach up to 70%.

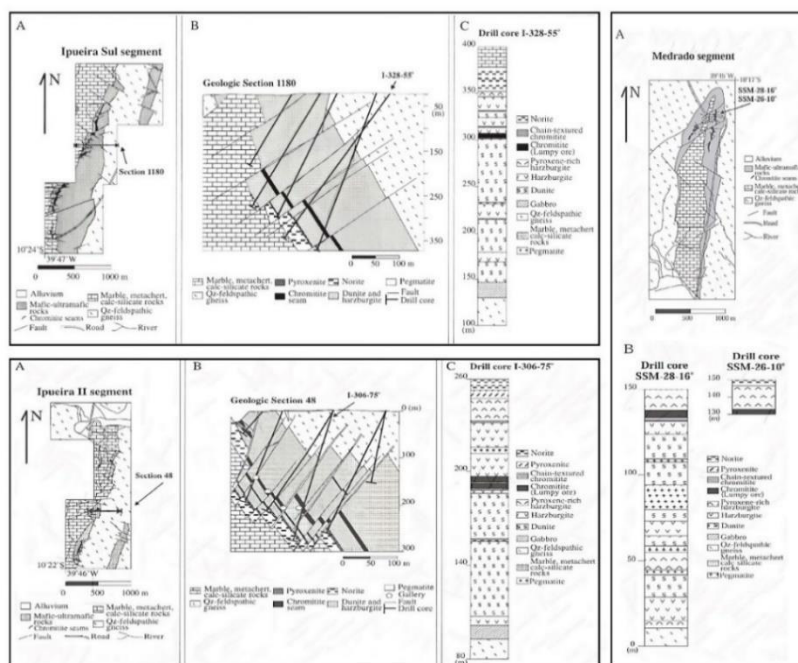


Figure 4 - Detail map and stratigraphic section of the underground mine of the Medrado, Ipueira Sul, and Ipueira II sill segment. Internal mining report of Jacurici Valley S.A.

Source: partially adapted from Marques and Ferreira Filho (2003)

4. Conclusions

The work sought to bring in a bibliographic review of some concepts and theories about chromite mineralization models. Therefore, in its scope, it was structured in information and classification of chromitic deposits according to the shape of the geological body (stratiform or podiform) and chromium remobilization (On-stage or Off-stage).

The focus was on the mafic-ultramafic deposits of the Jacurici Valley complex in the state of Bahia (Ipueira-Medrado segment). Studies carried out in other deposits of the same genus, such as mineralizations of the segment mentioned above, were formed in a stratiform deposit model with a closed remobilization system (Off-stage).

The deposits of the Vale Jacurici Complex are mostly formed by deposits of metallurgical-type chromium grades, and their grades are high for an ore-type class (lump). In the municipality of Andorinhas, where they are located as the mines of Ipueira-Medrado, medium ores (lump type) are found, with contents in the order of 38% of Cr_2O_3 . As a major characteristic of the local ore, it is aluminous, with grades in the range of 17.2% to 20.5%. Based on estimates provided by the Companhia de Ferro-Ligas da Bahia (FERBASA), the mineral deposits in this region have total reserves exceeding 20 million tons, which are sufficient to sustain a useful life of 30 years.

As for the structural form, it still reverberates discussions about its structuring. Two discussions are raised regarding the formation model: a) sinform fold or b) inverse faults generated through thrust zones. Both theories are still in force and are discussed.

Although there are works focused on the geological characterization of the area, mainly on the surface and structural geology, there is low production of works in other branches of geosciences. This condition ends up generating gaps that have not yet been filled. The idealization of specialized study fronts would open new horizons for mineral research.

Within the economic sphere, geostatistical studies applied to drillhole geochemistry would help determine the continuities and directions of mineralizations. Implementing new geoprocessing techniques in Remote Sensing products and terrestrial geophysics by resistivity method, for example, would be excellent support in the delimitation of the physical body of the mineral or even in obtaining new study targets.

Regarding environmental studies, research in fields such as environmental geology, medical geology, and hydrogeology would allow analyzes of the condition of the environment and possible health risks to residents. Thus, with the detention of this knowledge, studies could be directed to identify if the mining activity causes problems.

Acknowledgments

The authors are grateful to the Department of Geology, the Graduate Program, Laboratory of Geoprocessing of Ceará (GEOCE), and the Science Center of the Federal University of Ceará for the structure made available to carry out the research. **Funding:** Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico (FUNCAP) supported this work (Process: BMD-0008-01397.01.08/21), which provided a postgraduate scholarship at the master's level that guaranteed ideal conditions for scientific research and the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

References

- ALKMIM, F. F. What makes a craton a craton? The São Francisco craton and the Almeidian revelations when delimiting it. In: MANTESSO-NETO, V.; BARTORELLI, A.; CARNEIRO, C.D.R.; BRITO NEVES, B. B. (Org.). *Geology of the South American Continent: Evolution of the Work of Fernando Flávio Marques de Almeida*. São Paulo:Beca, p. 17-34, 2004.
- ALMEIDA, F. F. M. The São Francisco Craton. *Brazilian Journal of Geosciences*, v. 7, no. 4, 349-364, 1977. ALMEIDA, F. F. M. O Cráton do São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 7, n. 4, 349-364, 1977.
- ALMEIDA, H. L. DE; Cabral, E.B.; Bezerra, F. X. Deformational evolution of rocks from the Jacurici Valley: preparation for the structuring of mafic-ultramafic chromitiferous bodies. *US Geology. Scientific Series*, vol. 17, no. 2, pg.71, 1 Aug, 2017.
- ALVES, C. D. S. Characterization of the rock mass with the use of drill cores at the Ipueira 3 mine, Andorinha - Bahia. *Campina Grande, 2005*. 140p. Master's thesis, Federal University of Campina Grande, Campina Grande-PB, 2005.
- BARBOSA, J. S. F. Synthesis of knowledge on the geotectonic evolution of Archean and Paleoproterozoic metamorphic rocks of the São Francisco Craton basement in Bahia. *Brazilian Journal of Geosciences*, v. 27, n. 3, 241–256, 1997.
- BARBOSA, J. S. F.; Sabaté, P. Archean and Paleoproterozoic crust of the São Francisco Craton, Bahia, Brazil: geodynamic features. *Precambrian Research*, v. 133, n. 1-2, p. 1-27, 2004.
- BARBOSA, J. S. F.; Sabaté, P.; Dominguez J. M. L. The State of Bahia in the South American Platform, its subdivisions, criteria for stratigraphic stacking of platform covers, and geotectonic cycles. *Geology of Bahia: Explanatory Text for the Geological Map at Millionth: Salvador*. Secretary of Industry, Trade and Mines/Superintendence of Geology and Mineral Resources, v. 2, 39-66. 1996.

- BIONDI, João Carlos. Metallogenic processes and Brazilian mineral deposits. -two. Ed. To see. And current. TextsOffice. São Paulo, p.56-57, 2015.
- BRITO NEVES, B. B.; NETO, M. C. C.; FUCK, R. A. From Rodinia to Western Gondwana: An approach to the Brasiliano-Pan African Cycle and orogenic collage. *Episodes*, v. 22, n. 3, 155-166, 1999.
- CAMPOS NETO, M. C. Orogenic Systems from Southwestern Gondwana: An approach to Brasiliano-PanAfrican Cycle and Orogenic Collage in Southeastern Brazil. In: CORDANI, U. G.; MILANI, E. J.; THOMAZ FILHO, A.; CAMPOS, D. A. (Org.). *Tectonic Evolution of South América*. Rio de Janeiro: 31st International Geological Congress, p.335–365, 2000.
- CAMERON, E. N. Evolution of the Lower Critical Zone, central sector, eastern Bushveld Complex, and its chromitedeposits. *Economic Geology*, v. 75, n. 6, 845–871, 1980.
- CARVALHO, L.M., Ramos, M.A.B.. Geodiversity in the state of Bahia. 2010.
- DALLA COSTA, M.M., Fernandes L., Duarte J.E.C., Recuero J.C. (coords.). Anuário mineral estadual Minas Gerais. Anos base 2010 a 2014. Brasília, Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), 133 p. 2017.
- DEL LAMA, E. A.; Candia, M. A. F.; Szabó, G. A. J. Petrography and metamorphism of the metasedimentary country-rocks of the Jacurici Valley Chromitite-Hosting mafic-ultramafic complexes, Bahia, Northeastern Brazil. *Geologia USP, Série Científica*, v. 1, n. 1, 01-15, 2001.
- DEUS, P. B.; Viana, J. S. Chromitic District of the Jacurici River Valley. 32 nd Brazilian Geology Congress, v. 3, 44-52, 1982.
- DIAS, J. R. V. P. et al. Regional high-grade metamorphic peak imprint in zircons from the mafic-ultramafic Jacurici Complex, São Francisco Craton, Brazil. *Brazilian Journal of Geology*, v. 52, n. 1, 2021.
- EALES, H. V. Implications of the chromium budget of the Western Limb of the Bushveld Complex. *South African Journal of Geology*, v. 103, 141-150, 2000.
- FERREIRA FILHO, C. F. Chromitites associated with layered complexes in Brazil: testing "one-fit-all" genetic models. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 74, n. 3, 554-554, 2002.
- FIGUEIREDO, A. N. Depósitos de cromita de Goiás e Campo Formoso (BA) – diagnóstico e análise comparativa. *Revista Brasileira de Geologia*, v. 7, n. 1, pág. 73-83, 1977.
- FRIEDRICH, B. M.; Marques, J. C; Olivo, G. R.; Frantz, J. C.; Joy, B.; Queiroz, J. A. Q.; Petrogenesis of the massive chromitite layer from the Jacurici Complex, Brazil: evidence from inclusions in chromite. *Mineralium Deposita*, v. 55, n.6, 1105-1126, 2019.
- IRVINE, T. N. Origin of chromitite layers in the Muskox intrusion and other stratiform

intrusions: A new interpretation. *Geology*, v. 5, n. 5, 273, 1977.

JACKSON, E. D. Primary textures and mineral associations in the ultramafic zone of the Stillwater Complex, Montana.

U.S. Geological Survey, Professional Papers 358, 106. 1961.

JACKSON, E. D. Stratigraphic and lateral variation of chromite composition in the Stillwater Complex. *Mineralogical Society of America Special Paper*, v. 1, 46-54. 1963.

KOSIN, M.; De Mello, R. C.; De Souza, J. D.; De Oliveira, A. P.; Carvalho, M. J.; Leite, C. M. Geology of the northern segment of the Itabuna-Salvador-Curaçá orogen and tour guide. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 33, n. 1, 15–26, 2003.

LIMA, T.M.; NEVES, C.A.R. (coords.). *Mineral Summary 2015*. Brasília, National Department of Mineral Production (DNPM), v. 35, 135 p. ISSN: 01012053. 2016.

LIMA, J. M. G. Product 12: chromium ore. Technical Report 21: Profile of Chromium Mining. Contract No. 48000.003155/2007-17: development of studies for the preparation of the duodecennial plan (2010 - 2030) for geology, mining and mineral transformation. International Bank for Reconstruction and Development – IBRD. August, 2009.

LIPIN, B. R. Pressure Increases, the Formation of Chromite Seams, and the Development of the Ultramafic Series in the Stillwater Complex, Montana. *Journal of Petrology*, v. 34, n. 5, 955–976, 1993.

MACHADO N., Noce C. M., Ladeira E. A., Belo de Oliveira O. A. U-Pb geochronology of Archean magmatism and Proterozoic metamorphism in the Quadrilátero Ferrífero, southern São Francisco Craton, Brazil. *Geological Society American Bulletin*, v. 104, n. 9, 1221-1227, 1992.

MALLOTIS, G. *Minerals Information Ltd. Chromium: Uses & Markets*, Published by Industrial. Worcester, England: Minerals Information Ltd., 1999.

MARINHO, M. M., Rocha, G. F., Deus, P. B., Viana, J. S. Geology and chromitic potential of Vale do Jacurici-Bahia.

34 th Brazilian Geology Congress, 2074-2088, 1986.

MARQUES, J. C.; Filho, C. F. F. The Chromite Deposit of the Ipueira-Medrado Sill, São Francisco Craton, Bahia State, Brazil. *Economic Geology*, v. 98, n. 1, 87-108, 2003.

MOORES, E. M. A personal history of the ophiolite concept. *Special papers geological Society of America*, 17-30, 2003.

NOCE, C. M.; Machado, N.; Teixeira, W. U-Pb Geochronology of gneisses and granitoids in the Quadrilátero Ferrífero (southern São Francisco Craton): age constraints for archean and paleoproterozoic magmatism and metamorphism. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 28, n. 1, 95-102, 1998.

OLIVEIRA, R. C. L. M.; Neves, J.P.; Pereira, L.H.M.; MACÊDO, L.L. Mota, E.L.; Santiago, R.C. Teixeira, L.R. Folha SC.24-Y-B-II Andorinha: carta geológica -

escala 1:100.000. Salvador: CPRM, 1 mapa, color. Escala 1:100.000, 2016.

- SAMPAIO, J.A.; ANDRADE, M.C.; PAIVA, PAIVA, P. R. P. Chromita. In: Adão Benvindo da Luz and Fernando Freitas Lins. (Org.). *Industrial Rocks & Minerals* 2nd ed. Rio de Janeiro: CETEM, p. 403-426, 2005.
- SILVEIRA, C.J.S.; Frantz, J.C.; Marques, J.C.; Queiroz, W.J.A.; Roos, S.; Peixoto, V. M. U-Pb geochronology in zircon of intrusive and basement rocks in the Vale do Jacurici region, São Francisco Craton, Bahia. *Brazilian Journal of Geology*, v. 45, no. 3, 453–474, 2015.
- STOWE, C. W. Compositions and tectonic settings of chromite deposits through time. *Economic Geology*, v. 89, n.3, 528–546, 1994.
- TEIXEIRA W.; Sabaté J. P.; Barbosa J.; Noce C. M.; Carneiro A. M. Archean and Paleoproterozoic tectonic evolution of the São Francisco Craton. In: CORDANI, U. G.; MILANI, E. J.; THOMAZ FILHO, A.; CAMPOS, D. A. (Org.). *Tectonic Evolution of South América*. Rio de Janeiro: 31st International Geological Congress, p. 101-138, 2000
- THAYER, T. P.; Jackson, E. D. A classification of igneous rocks by their history of crystallization and emplacement. *U. S. Geology*, 79-83, 1972.
- VOORDOUW, R.; Gutzmer, J.; Beukes, N. J. Intrusive origin for Upper Group (UG1, UG2) stratiform chromitite seams in the Dwars River area, Bushveld Complex, South Africa. *Mineralogy and Petrology*, v. 97, n. 1-2, 75–94, 2009.