



**INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA**

CAROLINE VOLCATO OLEQUES

**AVALIAÇÃO DA COMPARTIMENTAÇÃO GEOESTATÍSTICA EM UM DEPÓSITO
MINERAL DA FORMAÇÃO CAUÊ, MG.**

Porto Alegre

2024

CAROLINE VOLCATO OLEQUES

**AVALIAÇÃO DA COMPARTIMENTAÇÃO GEOESTATÍSTICA EM UM DEPÓSITO
MINERAL DA FORMAÇÃO CAUÊ, MG.**

Trabalho de Conclusão de Curso de Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, apresentado na forma de monografia, junto à disciplina Projeto Temático III, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Orientadores: Prof. Dr. Diego Machado Marques

Coorientação: Eng.Minas Gabriela Abreu

Porto Alegre

2024

CIP - Catalogação na Publicação

Volcato Oleques, Caroline
AVALIAÇÃO DA COMPARTIMENTAÇÃO GEOESTATÍSTICA EM UM
DEPÓSITO MINERAL DA FORMAÇÃO CAUÊ, MG / Caroline
Volcato Oleques. -- 2025.
85 f.
Orientador: Diego Machado Marques.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto
de Geociências, Curso de Geologia, Porto Alegre,
BR-RS, 2025.

1. Geoestatística. 2. Domínios estacionários. 3.
Minério de ferro. I. Machado Marques, Diego, orient.
II. Título.

CAROLINE VOLCATO OLEQUES

**AVALIAÇÃO DA COMPARTIMENTAÇÃO GEOESTATÍSTICA EM UM DEPÓSITO
MINERAL DA FORMAÇÃO CAUÊ, MG.**

A comissão examinadora, abaixo assinada, aprova o Trabalho de Conclusão de Curso apresentado na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte das exigências para a obtenção do título de Bacharel em Geologia.

Porto Alegre, 9 de dezembro de 2024.

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Dr^a. Juliana Charão Marques

Dr^a. Daiane dos Santos Cardoso

Msc. Wilmer Emilio García Moreno

AGRADECIMENTOS

A frase “L’essentiel est invisible pour les yeux” que significa “O essencial é invisível aos olhos” do livro “O Pequeno Príncipe” sempre fez muito sentido pra mim. Que sorte a minha ter pessoas ao meu redor, que durante a minha trajetória, enxergaram o essencial além dos olhos, mas sim, com o coração. E assim, quero agradecer primeiramente, à pessoa que tem o maior coração do mundo que eu conheço, a minha mãe, Rosana, meu exemplo de carinho e que sempre fez tanto por nós. À minha irmã Viviane, que é meu exemplo de força e determinação, ao meu cunhado Daniel que acompanhou todas as etapas dessa conquista. À minha afilhada, Victória e meu sobrinho Matteo, que são as nossas alegrias. Vocês são o meu pilar, eu amo vocês.

À família Volcato, em especial à Tia Hermínia, que me apoiou lá no início, quando surgiu o sonho de entrar em uma federal, jamais esquecerei.

Esse trabalho não seria possível, se não fosse ao meu orientador Diego, muito obrigada por sempre me ouvir, apoiar e dar suporte, além de amigo, lhe admiro como profissional. Aos meus amigos e colegas do LERN, Laisa, Fernanda, e em especial ao Ismael, que dedicou boa parte do seu tempo em me ajudar. Ao Augustinho do LPM, sempre solícito.

Às minhas eternas amigas/irmãs, Giovana e Paloma, e sua família Ochoa, na qual eu agreguei pra minha vida, vocês me acompanham há 20 anos, e sabem o que isso significa para mim, vocês vão estar pra sempre em meu coração.

Aos meus amigos que eu adquiri nesse curso e vou levar para o resto da vida: Gabriel, que sempre me apoiou, em tantos momentos. Às minhas amigas e companheiras de moradia, Cássia e Laís, ter vocês nesse período foi essencial, quantas noites, quantas conversas, tudo isso me fortaleceu para que eu chegasse nessa etapa. Raíssa e Adriana, além de todo o apoio, os nossos “dar um dez”, podem parecer simples, mas trouxe a leveza que eu precisava. A Natália “Maravilhosa” como está nos meus contatos, não é à toa. A Renata que possui uma doçura e força ao mesmo tempo. A Amanda com seu jeitinho carinhoso bruto com seus abraços. Ao pessoal que sempre me tiraram belas risadas, os momentos com vocês foram essenciais: Priscila, Jordana, Stephani, Laura, Maurício, Christian, Pedro, Luca, Misael e Emmanuel.

À professora Amandinha, que tanto escuta nossos desabafos, mas também compartilhamos muitos sorrisos.

A Andrea Sander, que me acolheu e que tanto admiro. Fez com que eu me encantasse com as olivinas também.

A Gabriela, minha supervisora que junto a CSN pôde fazer com que esse trabalho fosse possível.

A todos vocês, faltam palavras para expressar o quanto sou grata. Lembro da Carol que, ao passar de ônibus pelo letreiro da UFRGS a caminho de outra universidade, tinha a convicção que também faria parte dessa federal. Naquela época, eu não fazia ideia de quantas pessoas incríveis o destino colocaria no meu caminho.

Por fim, agradeço ao meu país por fazer com que exista universidades públicas de qualidade como a UFRGS na qual eu faço parte.

Muito Obrigada! <3

RESUMO

Em Geociências, se faz cada vez mais necessário a utilização de ferramentas para quantificar e representar modelos volumétricos de diferentes propriedades. Entretanto, essas quantificações não podem ser feitas de uma maneira puramente matemática. É necessário que tenha um prévio conhecimento do contexto geológico, e de técnicas que permitam incorporar esse conhecimento nas quantificações. Igualmente importante, é entender o comportamento estatístico, e sua relação com o contexto geológico, definindo regiões onde há conectividade espacial e homogeneidade estatística, denominadas de domínios estacionários. Regiões com características muito distintas devem ser individualizadas em processos de estimativa. Esse processo de definição de domínios estacionários não é trivial, podendo ter relação tanto com processos primários quanto secundários. Processos geológicos podem ter uma complexidade espacial, sendo necessário o uso de geoestatística para entender essa complexidade. Domínios inicialmente considerados estacionários, como uma distribuição geoquímica, pode ser dividida em subdomínios, muitas vezes relacionadas a questões estruturais. Questões direcionais da formação do evento geológico, em geoestatística, são denominadas de anisotropia, que quando incorporada ao processo de estimativa de um fenômeno natural, leva a uma maior aderência entre o modelo e a realidade. Dessa forma, é importante estudar e analisar o impacto de feições e características no resultado final da compartimentação espacial. O trabalho tem como base realizar esse tipo de análise em um depósito tradicional em minério de ferro situado no Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais, com características estruturais presentes. Atualmente, o alvo de estudo é dividido em três grandes estruturas. Entretanto, faz-se necessário um estudo geoestatístico que verifique a necessidade de compartimentação espacial dos domínios geoquímicos seguindo essa compartimentação estrutural, ou se processos secundários levaram a uma remobilização dos minerais, o que permitiria uma simplificação dos processos de estimativa, essa análise geralmente é complexa nesse tipo de mineralização, dada às relações multivariadas. Logo, para a realização deste estudo foi utilizado um banco de dados composto de informações geoquímicas, bem como compartimentações dos litotipos presentes descritos pela empresa, leituras e mapeamento estrutural da mina, avaliando o contexto geológico

regional, verificando dentro das divisões dos domínios propostos estruturais pela empresa e os dados presentes de litologia e o impacto que exerceria nas avaliações em dados resultantes da estatística univariada e continuidade espacial. Como resultado, essa análise geoestatística mostrou se a compartimentação espacial atual é adequada para uma representação quanto ao fenômeno geológico, ou se há necessidade de uma redefinição dos domínios estacionários, reconsiderando critérios estruturais, garantindo uma estimativa mais precisa e acurada quando comparado às informações já disponíveis.

Palavras-Chave: Geoestatística. Compartimentação. Domínios estacionários. Minério de ferro.

ABSTRACT

In Geosciences, the use of tools to quantify and represent volumetric models of different properties is increasingly necessary. However, these quantifications cannot be conducted in a purely mathematical manner. Prior knowledge of the geological context and techniques that allow this knowledge to be incorporated into the quantifications are essential. Equally important is understanding the statistical behavior and its relationship with the geological context, defining regions where there is spatial connectivity and statistical homogeneity, known as stationary domains. Regions with very distinct characteristics must be individualized in estimation processes. This process of defining stationary domains is not trivial, as it can relate to both primary and secondary processes. Geological processes can exhibit spatial complexity, making it necessary to use geostatistics to understand this complexity. Initially considered stationary domains, such as a geochemical distribution, may be divided into subdomains, often related to structural issues. Directional aspects of the formation of the geological event, in geostatistics, are termed anisotropy, which, when incorporated into the estimation process of a natural phenomenon, results in greater alignment between the model and reality. Thus, it is important to study and analyze the impact of features and characteristics on the final result of spatial compartmentalization. This work is based on conducting such an analysis in a traditional iron ore deposit located in the Quadrilátero Ferrífero, in Minas Gerais, with present structural characteristics. Currently, the study target is divided into three major structures. However, a geostatistical study is required to verify whether there is a need for spatial compartmentalization of geochemical domains following this structural division, or if secondary processes have led to mineral remobilization, which would allow for a simplification of the estimation processes. This analysis is generally complex for this type of mineralization, given the multivariate relationships. Therefore, a database composed of geochemical information, as well as compartmentalizations of the present lithotypes described by the company, structural readings, and mine mapping was used in this study. The regional geological context was evaluated, examining the structural domain divisions proposed by the company, the lithology data, and their impact on assessments of univariate statistics and spatial continuity. As a result, this geostatistical analysis will show whether the current

spatial compartmentalization is suitable for representing the geological phenomenon, or if there is a need to redefine stationary domains, reconsidering structural criteria to ensure a more precise and accurate estimation compared to the information already available.

Keywords: Geostatistics. Compartmentalization. Stationary domains. Iron ore.

LISTA DE ABREVIATURAS

AA - Análise de Agrupamento
ACP - Análise de Componentes Principais
BIF - *Banded Iron Formation*;
CN - Corpo Norte
CP - Corpo Principal
EDA - *Exploratory Data Analysis*
ENG - Engenho
FFB - Formações Ferríferas Bandadas
IDW - *Inverse Distance Weighting*
IGEO – Instituto de Geociências;
IUGS – *International Union of Geological Sciences*;
PCA - Principal Component Analysis
QF – Quadrilátero Ferrífero;
UFRGS –Universidade Federal do Rio Grande do Sul;
USGS - *United States Geological Survey*

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1:** Principais formações ferríferas distribuídas segundo tempo geológico (modificado de Klein, 2005, apud Longo, 2023). 27
- Figura 2:** modelo esquemático das Formações Ferríferas Bandadas (FFB) (Extraído de Y.Wang, 2009). 30
- Figura 3:** Mapa de Localização da área de estudo (extraído de Lagoeiro 2000, modificado de Dorr 1969, apud Trzaskos, 2011). 32
- Figura 4:** Coluna litoestratigráfica das unidades do QF com destaque para a Formação Cauê (modificado de Alckmin & Marshak, 1998). 35
- Figura 5:** Mapa geológico da área de estudo, destacando formações e unidades do Supergrupo Minas, tipos de falhas e ocorrências de minério de ferro (>64% Fe). (Extraído de Silveira, V. D. et al. 2017) 37
- Figura 6:** Imagens representativas da geologia local. (a) afloramento ressaltando contato entre itabirito de alto e baixo teor. (b) amostra de quartzo itabirito. (c) rocha de itabirito demarcando a intercalação de chert e ferro. (d) itabirito silicoso. (e) itabirito carbonático. (f) afloramento de xisto do Gr. Nova Lima, SG. Rio das Velhas. 38
- Figura 7:** representação de um semivariograma destacando seus principais parâmetros (Extraído de F.F Batista, 2012). 42
- Figura 8:** arranjos ilustrando dois fenômenos espaciais: o da esquerda isotrópico e o da direita anisotrópico (Modificado de Yamamoto, 2013, p.34 apud A.D.Reis, 2014) 44
- Figura 9:** Mapa de tipologias agrupadas. Em azul, itabiritos e em vermelho hematitas. 46
- Figura 10:** Mapa de distribuição espacial dos furos de sondagem e suas profundidades em metros. 49
- Figura 11:** Mapa de dados estruturais com contornos DXF, destacando os setores CN, CP e ENG, delimitados nas cores vermelha, azul e verde, respectivamente, e os pontos de dados estruturais plotados na área dos DXFs. 50
- Figura 12:** Representação do funcionamento do método k-means para definição de três grupos (adaptado de Tan et al. (2006)). (Extraído de Moreira, 2020). 52
- Fig 13:** Histograma da variável Fe_GL sem qualquer segmentação por litotipo 54

Figura 14: Histograma das hematitas (esquerda) e dos itabiritos (direita), referentes ao setor CN. 55

Figura 15: Histograma das hematitas (esquerda) e dos itabiritos (direita), referentes ao setor CP. 56

Figura 16: Histograma das hematitas (esquerda) e dos itabiritos (direita), referentes ao setor ENG. 57

Figura 17: Variogramas referentes ao setor Corpo Norte (CN), acima das hematitas e abaixo para itabiritos. 61

Figura 18: Variogramas referentes ao setor Corpo Principal (CP), acima das hematitas e abaixo para itabiritos 62

Figura 19: Variogramas referentes ao setor ENG, acima das hematitas e abaixo para itabiritos. 63

Figura 20: Mapas de dispersão das amostras de S0, evidenciando a distribuição de dip (esquerda) e azimute (direita) em uma área georreferenciada. A escala de cores indica a variação dos valores, com tons frios para valores baixos e tons quentes para valores altos. A linha preta delimita os setores da região de estudo. 68

Figura 21: Mapa de interpolação dos dados estruturais de dip (mergulho) e azimute para S0. 68

Figura 22: Mapas de dispersão das amostras de SN, evidenciando a distribuição de dip (esquerda) e azimute (direita) em uma área georreferenciada. A escala de cores indica a variação dos valores, com tons frios para valores baixos e tons quentes para valores altos. A linha preta delimita os setores da região de estudo. 66

Figura 23: Mapa de interpolação dos dados estruturais de dip (mergulho) e azimute para SN 69

Figura 24: Gráfico de determinação do número ideal de clusters utilizando os critérios de Inércia e Calinski-Harabasz normalizados. 71

Figura 25: Mapa de clusters para dip e azimute com pontos de dados originais, destacando a distribuição espacial dos 3 clusters em diferentes cores conforme a legenda lateral e os pontos pretos indicam a localização dos dados originais. 72

Figura 26: Mapa de clusters para dip e azimute com pontos de dados originais,

destacando a distribuição espacial dos 5 clusters em diferentes cores conforme a legenda lateral e os pontos pretos indicam a localização dos dados originais. 73

Figura 27: Distribuição de 5 clusters em 2D. As cores indicam os grupos identificados na redução de dimensionalidade. 75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Principais minerais de ferro e suas respectivas classes (modificado de Poveromo et al., 1999)	23
Tabela 2: Principais países produtores de ferro e suas reservas estimadas conforme o ano (Mineral Commodity Summaries, 2024, USGS)	24
Tabela 3: Principais substâncias produzidas - Participação no faturamento do setor. (Mineração em números, IBRAM)	24
Tabela 4: Principais investimentos previstos 2024-2028 (Panorama Mineração do Brasil, IBRAM)	25
Tabela 5: Valores de estatística descritivas do teor (Fe_GL) referentes ao histograma gerado acima do setor CN.	55
Tabela 6: Valores de estatística descritivas do teor (Fe_GL) referentes ao histograma gerado acima do setor CP.	56
Tabela 7: Valores de estatística descritivas do teor (Fe_GL) referentes ao histograma gerado acima do setor ENG.	57
Tabela 8: Valores da análise variográfica multidirecional para os setores CN, CP, e ENG.	64

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
2 OBJETIVOS	18
3 JUSTIFICATIVA	19
4 REFERENCIAL TEÓRICO	21
4.1 Contextualização Geológica	21
4.1.1 Minério de Ferro	21
4.1.2 Sílica	25
4.1.3 Gênese dos depósitos de minério de ferro	26
4.1.4 Depósitos do tipo Formações Ferríferas Bandadas (FFB)	28
4.1.5 Quadrilátero Ferrífero	31
4.1.6 Geologia da área em estudo	36
4.2 Conceitos de Geoestatística	39
4.2.1 Estacionariedade	39
4.2.2 Análise Univariada	39
4.2.3 Análise Multivariada	40
4.2.4 Continuidade Espacial	41
4.2.5 Ponderação pelo Inverso da Distância	44
5 BANCO DE DADOS	46
6 METODOLOGIA	48
6.1 Revisão Bibliográfica	48
6.2 Análise Exploratória de Dados (EDA)	48
6.3 Variografia	51
6.4 Clustering por K-Means	52
7. RESULTADOS	53
7.1 Análise Exploratória dos Dados : estatística básica e multivariada	53
7.2 Análise de continuidade espacial	58
7.3 Análise Multivariada (Machine Learning) de Dados Estruturais de Superfície	67
7.3.1 Clustering por K-Means	70
8. DISCUSSÃO	77
9. CONCLUSÃO	78
10. REFERÊNCIAS	81

1 INTRODUÇÃO

Em Geociências, muitas vezes faz-se necessário o entendimento qualitativo e quantitativo de um conjunto de dados. Para isso, pode ser necessário a compartimentação espacial da área de estudo em domínios estatisticamente homogêneos, aqui chamados de estacionários. Isso leva ao questionamento de qual a melhor alternativa para tomada de decisão na divisão desses domínios ditos estacionários, podendo variar em decisões a partir da litologia, geoquímica, geotécnica, estrutural ou uma combinação dos mesmos. Dessa maneira, este projeto abordou a questão de como efetuar tal compartimentação de um ponto de vista geoestatístico, levando em consideração a conectividade espacial em adicional a estatística tradicional, que muitas vezes possuem desafios em capturar a real natureza dos fenômenos geológicos. As abordagens tradicionais podem variar desde a divisão baseada em litologias e tipologias até a utilização de informações geológicas mais subjetivas, como distribuições geoquímicas e mineralógicas. Estas últimas, muitas vezes não visíveis a observações macroscópicas ou em leituras de campo, sendo assim, necessário demandarem de ferramentas adicionais para uma compartimentação geológica mais precisa. A questão central neste estudo foi definir os domínios estacionários em processos de avaliação geoestatística, questionando se deveria associá-los estritamente a litologias/tipológicas ou agrupá-los considerando fatores como a geoquímica. A resposta a esta pergunta é crucial, pois influencia diretamente a validade dos modelos estatísticos e, conseqüentemente, todas as análises subsequentes.

Crítérios historicamente estabelecidos para modelos geológicos vem sendo reavaliados, em função da popularização de novas técnicas geoestatísticas. Este estudo procurou correlacionar informações geológicas tradicionais com dados recentes, utilizando ferramentas avançadas de análise geoestatística e multivariada. O objetivo foi reavaliar a estrutura geológica da área de estudo, integrando conhecimentos teóricos e práticos para uma representação mais fidedigna do fenômeno geológico.

Esse projeto combinou diferentes fontes de dados para avaliar indiretamente a conectividade espacial dos corpos geológicos. Com o uso de abordagens geoestatísticas, foi possível quantificar as semelhanças e diferenças

entre características geológicas na região estudada, superando as limitações das observações de campo ou descrição tradicional dos testemunhos de sondagem.

Esta abordagem proporcionou uma compreensão mais abrangente e detalhada, crucial para otimizar processos posteriores baseados na avaliação geoestatística. Além disso, este trabalho combinou métodos estatísticos e geoestatísticos em busca de uma compreensão mais profunda e precisa dos domínios geológicos. Com isso, pode-se não apenas avançar no conhecimento teórico, mas também aplicar esse entendimento de maneira prática, melhorando significativamente as práticas de exploração e gestão de recursos naturais.

2 OBJETIVOS

Este trabalho visa analisar, a partir de técnicas geoestatística no entendimento geoquímico e estrutural na região do local em uma mina de ferro, localizada na Formação Cauê, inserida na porção inferior do Grupo Itabira (Figura 4), hospedados no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, reavaliando o entendimento e a compartimentação atual dos domínios estacionários da área de estudo, avaliando as variações e semelhanças entre diferentes eventos geológicos, proporcionando uma compreensão mais detalhada dos fenômenos geológicos. Para isso, o trabalho contou em:

- Integrar os dados (utilizando-se do banco de dados multivariado, contendo informações sobre geoquímica, geologia estrutural e divisão litológica);
- Avaliar os domínios estruturais atualmente vigentes, utilizando-se de critérios geoestatísticos, a partir da análise de continuidade espacial da geoquímica;
- Verificar se o comportamento dos variogramas é diferente ou semelhante entre os domínios estruturais e o impacto de agrupamentos entre os mesmos;
- Propor domínios geoestatísticos e associados a estruturas regionais;
- Integrar e interpretar as informações de resposta geoestatística e multivariada, correlacionando os resultados com a bibliografia;

3 JUSTIFICATIVA

A importância do desenvolvimento deste estudo é associar técnicas matemáticas na integração de dados de diferentes fontes e processos com o uso da geoestatística, comparando o entendimento individual de cada uma dessas áreas de estudo, de forma multivariada, visando uma melhoria no entendimento geológico da região de estudo, e proporcionando melhorias nos processos de exploração mineral de ferro. A questão estrutural da área e seu impacto na estrutura espacial da geoquímica é tema de debate entre os profissionais envolvidos em seu estudo, e combinar fatores estruturais e geoquímicos, provenientes de uma base de dados extensa, podem facilitar o entendimento do processo geológico de formação.

Um aspecto diferenciado deste projeto é a combinação de diferentes fontes de dados para avaliar indiretamente a conectividade espacial dos corpos geológicos. Utilizando técnicas geoestatísticas, foi possível quantificar as semelhanças e diferenças entre eventos geológicos na região estudada, superando as limitações das observações de campo. Esta abordagem integrada multitécnicas proporcionando uma compreensão mais abrangente e detalhada, crucial para otimizar processos posteriores baseados na avaliação geoestatística.

Neste projeto, através de ferramentas geoestatísticas, pode-se ter uma compreensão mais profunda e precisa dos domínios geológicos. Com isso, não apenas avançou no conhecimento teórico, mas também aplicou-se esse entendimento de maneira prática, melhorando significativamente as práticas de exploração e gestão de recursos naturais.

Além disso, vale ressaltar que cada vez mais é necessário a integração de dados de diferentes fontes e diferentes escalas, sendo a geoestatística a ferramenta certa para esse estudo de dados multivariados. O estudo em geoestatística quando associado a geociências permite entender relações de origem complexa, simular diversos modelos de distribuição de domínios geológicos. A prática de localizar e diferenciar zonas geológicas auxilia na compreensão geológica permitindo uma otimização do processo de exploração mineral e maximização da utilização de recursos disponíveis, o que é uma necessidade no mundo atual.

4 REFERENCIAL TEÓRICO

4.1 Contextualização Geológica

4.1.1 Minério de Ferro

O elemento ferro (Fe) encontra-se na Tabela Periódica no período 4 e no grupo 8. Ele possui o número atômico 26 e está na categoria dos metais de transição. Devido às suas características, sabe-se que a maior parte do ferro presente nas formações ferríferas bandadas (FFB) foi transportada para o local de deposição em solução aquosa, embora haja raras exceções em que o ferro é transportado como complexos orgânicos em alguns riachos (Beck, 1972). O ferro dissolvido pode atingir concentrações apreciáveis (>1 ppm) nas águas naturais, especialmente em condições anaeróbicas. Em ambientes fortemente redutores, o íon sulfato é reduzido a espécies de sulfeto, resultando na precipitação do ferro dissolvido como sulfeto. Para entender a presença de ferro dissolvido nos oceanos profundos, é necessário considerar dois modelos. O primeiro sugere que o sulfato nos oceanos foi completamente reduzido a sulfeto e removido da solução como pirita, permitindo o acúmulo de Fe^{2+} . O segundo modelo, favorecido por Holland (1973), postula que o ferro foi reduzido a Fe^{2+} , mas o sulfato não foi reduzido a sulfeto. A ausência de espécies de enxofre dissolvido possibilita a existência estável de concentrações de Fe^{2+} em uma ampla faixa de valores de fugacidade de oxigênio (fO_2), enquanto a presença de espécies de enxofre dissolvidas limita essa faixa. Essa complexidade química e mineralógica nas FFB destaca a importância do contexto ambiental na formação e na composição dos depósitos de minério de ferro, evidenciando os desafios e as oportunidades na exploração desses recursos.

O minério de ferro é uma das matérias primas de uso mais antigo, sua descoberta encontra-se no Período Neolítico, daí por diante, seu uso vem sendo ampliado. Esse recurso mineral tem extrema importância para a economia global, devido à sua ampla gama de aplicações. Ele desempenha um papel fundamental na indústria siderúrgica e metalúrgica, sendo essencial para a produção de aço e ligas metálicas, que, por sua vez, são utilizados em diversas infraestruturas e produtos de consumo.

O aço é um material vital para a construção civil, automotiva e de maquinaria, destacando-se em projetos de engenharia e arquitetura. Ele abrange diversas áreas, como a fabricação de máquinas e equipamentos de alta tecnologia, onde componentes feitos de ferro são indispensáveis para o funcionamento de sistemas eletrônicos e mecânicos. Dito isso, o minério de ferro é utilizado na indústria de eletricidade, onde é utilizado em transformadores e motores elétricos, devido à sua capacidade de conduzir magnetismo. Também ressalta-se a contribuição na área de nutrição e medicina, sendo um componente chave da hemoglobina no sangue, suplementos e medicamentos que contêm ferro são comumente prescritos.

Encontra-se também no tratamento de água para remover contaminantes e partículas suspensas. Além de ser utilizado para a nutrição do solo, fabricação de tintas e corantes. Sendo assim, pode-se ter uma noção de sua importância. O minério de ferro é um elemento bastante comum na crosta terrestre, ocupando a quarta posição em termos de abundância, o que o torna um componente majoritário em várias classes minerais, podendo estar como componente principal ou secundário, tendo uma concentração média de cerca de 5%. Sua viabilidade econômica é composta principalmente por óxidos, sendo as suas formas primárias a Magnetita (Fe_3O_4) e a Hematita (Fe_2O_3). Essas substâncias, quando submetidas a altas temperaturas na presença de agentes redutores como o Monóxido de Carbono (CO) ou Hidrogênio (H_2), liberam o Ferro em sua forma metálica (Fe).

Além dos óxidos, o ferro também é encontrado na forma de hidróxidos (Goethita e Limonita), carbonatos (Siderita e Ankerita), sulfetos (Pirita, Calcopirita e Pirrotita) e silicatos. Ele possui facilidade em sofrer oxidação ou redução de acordo com o ambiente. Apesar de sua ampla distribuição, apenas algumas classes minerais são economicamente viáveis para exploração. Isso ocorre devido à quantidade de ferro nesses minerais ou à concentração dos minerais nas rochas que formam os corpos de minério. Os minerais de ferro de interesse econômico são agrupados de acordo com sua composição química em classes como óxidos, carbonatos, sulfetos e silicatos (Tabela 1), sendo esta última a de menor relevância econômica.

Tabela 1: Principais minerais de ferro e suas respectivas classes (modificado de Poveromo et al., 1999)

Classe	Mineral	Fórmula Química do mineral puro	Teor de Fe (%)
Óxido	Magnetita	Fe_3O_4	72,4
Óxido	Hematita	Fe_2O_3	69,9
Óxido	Goethita	$FeO(OH)$	62,8
Carbonato	Siderita	$FeCO_3$	49,2
Sulfeto	Pirrotita	FeS	63,6
Sulfeto	Pirita	FeS_2	46,5

A produção e o comércio de minério de ferro em 2023 tiveram um crescimento, provavelmente devido ao reabastecimento e ao aumento do consumo para produtos intermediários. A produção doméstica de minério de ferro foi estimada em 44 milhões de toneladas em 2023, um aumento de 13% em relação a 39 milhões de toneladas em 2022, segundo o *Mineral Commodity Summaries, 2024* da *United States Geological Survey* (USGS).

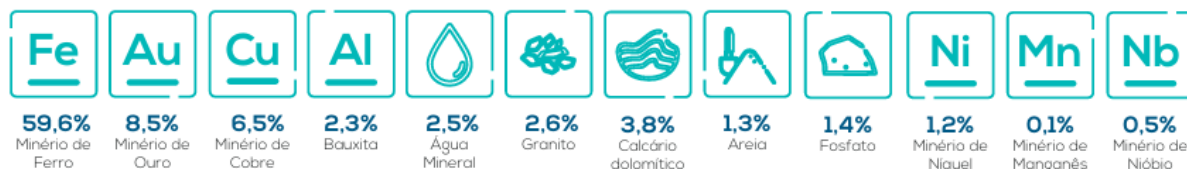
Em 2024, as reservas mundiais de minério de ferro foram estimadas pela U.S. Geological Survey (USGS) em cerca de 190 bilhões de toneladas. Os países com maiores reservas de minério de ferro são, de forma decrescente: Austrália (com reservas estimadas em 58 bilhões de toneladas), Brasil (possui cerca de 34 bilhões de toneladas), Rússia (29 bilhões de toneladas), China (20 bilhões de toneladas) e em quinto, a Ucrânia (6,5 bilhões de toneladas), esses valores e de outros países podem ser observados da Tabela 2.

Tabela 2: Principais países produtores de ferro e suas reservas estimadas conforme o ano (Mineral Commodity Summaries, 2024, USGS)

	Mine production				Reserves ⁵	
	Usable ore		Iron content		Crude ore	Iron content
	2022	2023 ^e	2022	2023 ^e		
United States	39,000	44,000	24,700	28,000	3,100	1,300
Australia	944,000	960,000	584,000	590,000	⁶ 58,000	⁶ 27,000
Brazil	435,000	440,000	276,000	280,000	34,000	15,000
Canada	69,000	70,000	41,400	42,000	6,000	2,300
Chile	17,700	18,000	11,100	11,000	NA	NA
China	272,000	280,000	170,000	170,000	20,000	6,900
India	251,000	270,000	156,000	170,000	5,500	3,400
Iran	78,300	77,000	51,300	50,000	3,300	1,500
Kazakhstan	53,600	53,000	8,890	8,800	2,500	900
Mauritania	12,700	13,000	7,950	8,100	NA	NA
Mexico	10,800	12,000	6,800	7,600	NA	NA
Peru	19,300	19,000	12,900	13,000	2,600	1,200
Russia	84,200	88,000	55,800	58,000	29,000	14,000
South Africa	63,700	61,000	40,500	39,000	990	620
Sweden	38,900	38,000	27,700	27,000	1,300	600
Turkey	17,700	17,000	10,700	10,000	152	99
Ukraine	34,100	36,000	21,300	22,000	⁷ 6,500	⁷ 2,300
Other countries	<u>57,200</u>	<u>48,000</u>	<u>32,200</u>	<u>27,000</u>	<u>18,000</u>	<u>9,500</u>
World total (rounded)	2,500,000	2,500,000	1,540,000	1,500,000	190,000	87,000

Nota-se que o Brasil possui relevância no mercado para esse commodity. Dentre as principais substâncias produzidas no Brasil, o minério de ferro destaca-se na participação e no faturamento do setor do minério com 59,6% (Tabela 3), sendo reconhecido mundialmente também pela qualidade do produto, contendo variações nos teores de ferro entre 60% e 67% nas hematitas e 50% a 60% nos itabiritos e jaspilitos.

Tabela 3: Principais substâncias produzidas - Participação no faturamento do setor. (Mineração em números, IBRAM)



Outro fator que comprova sua relevância, são os principais investimentos previstos de 2024 até 2028, e em primeiro lugar, está o ferro, ocupando 26,8% de participação (Tabela 4), isso influencia diretamente em avanços de novas pesquisas e trabalhos que venham a ser desenvolvidos no setor, para isso, é de suma

importância que novas técnicas e abordagens referente a mineração venham a ser desenvolvidas.

Tabela 4 : Principais investimentos previstos 2024-2028 (Panorama Mineração do Brasil, IBRAM)

PRINCIPAIS INVESTIMENTOS PREVISTOS 2024 - 2028						
VALORES EM MILHÕES US\$						
MINÉRIO	ORE	MINERAL	2023-2027	2024-2028	Variação [%]	Participação [%]
Minério de Ferro	Iron Ore	Mineral de hierro	16.922	17.277	2,1%	26,8%
Socioambientais	Environmental	Socioambiental	6.559	10.671	62,7%	16,6%
Logística	Logistics	Logística	4.448	10.362	133,0%	16,1%
Cobre	Copper	Cobre	4.474	6.744	50,7%	10,5%
Fertilizantes	Fertiliser	Fertilizantes	5.222	5.581	6,9%	8,7%
Níquel	Nickel	Níquel	2.338	4.440	89,9%	6,9%
Outras substâncias	Other substances	Otras sustancias	1.199	2.472	106,2%	3,8%
Bauxita	Bauxite	Bauxita	4.962	1.818	-63,4%	2,8%
Ouro	Gold	Oro	2.847	1.542	-45,8%	2,4%
Terras Raras	Rare Earths	Tierras raras	150	1.456	870,6%	2,3%
Lítio	Lithium	Lítio	433	1.190	174,8%	1,8%
Titânio	Titanium	Titanio	151	600	297,4%	0,9%
Manganês	Manganese	Manganeso	225	249	10,5%	0,4%
Zinco	Zinc	Zinc	113	59	-47,8%	0,1%
TOTAL	TOTAL	TOTAL	50.043,33	64.461,24	28,8%	100%

4.1.2 Sílica

No estudo em questão, o mineral de maior interesse é o ferro. No entanto, sabe-se que ele possui uma correlação inversa com a sílica, significando que, à medida que o teor de sílica aumenta, a de ferro diminui. Dessa forma, é importante ressaltar um breve contexto e informações relevantes à Sílica.

A sílica, ou dióxido de silício (SiO_2), é um mineral amplamente encontrado nas formações ferríferas bandadas (BFFs), desempenhando um papel crucial na composição e formação dessas rochas. Nas BFFs, a sílica geralmente se apresenta na forma de microcristais de quartzo ou em estado amorfo, e sua presença está intimamente relacionada ao processo de sedimentação, onde se forma a partir da precipitação química de Silício em ambientes aquáticos. As BFFs são compostas por alternâncias de camadas ricas em ferro e silício, com os minerais de ferro frequentemente se associando à sílica em proporções que variam de acordo com o ambiente deposicional e a diagênese. A interação entre a sílica e os óxidos de ferro,

como a Hematita e a Magnetita, resulta em características únicas de textura e mineralogia nas BFFs, influenciando suas propriedades físicas e químicas.

Além disso, a quantidade de sílica pode afetar diretamente o teor de ferro dos depósitos, uma vez que uma maior concentração pode diluir o teor de ferro, impactando a viabilidade econômica da exploração desses recursos. A sílica também é um componente essencial na formação de rochas metamórficas a partir das BFFs, onde processos tectônicos e térmicos podem alterar a sua estrutura e distribuição, gerando novos minerais e texturas.

4.1.3 Gênese dos depósitos de minério de ferro

Os depósitos de minério de ferro possuem uma ampla distribuição no período geológico e podem se formar em ambientes diversos. Eles podem ser classificados geologicamente em cinco categorias principais:

- i. Depósitos do tipo sedimentares acamadados ou formações ferríferas bandadas (do tipo Algoma, Lago Superior e Rapitan);
- ii. Depósitos do tipo vulcano-sedimentares e magmáticos (Kiruna e Lahn-Dill);
- iii. Depósitos formados por metamorfismo de contato do tipo Skarn;
- iv. Depósitos do tipo oolíticos e pisolíticos (tipo Clinton-Minette)
- v. Depósitos de alteração e acúmulo em superfície.

Dentre esses, o depósito do tipo sedimentar acamadado é o que possui maior importância de todas as classes de mineralizações ferríferas, principalmente do ponto de vista econômico, pois são os maiores depósitos de minério de ferro presentes no mundo e é justamente a que se deve o estudo do presente trabalho, sendo abordado de forma mais detalhada no próximo tópico. Seus teores podem variar de 20% a 35% e ultrapassar os 55%, Carajás, localizada no sudeste do estado do Pará, é um exemplo de uma das regiões mais ricas em recursos minerais do mundo, sendo reconhecida pela sua abundância em ferro de altíssima qualidade. Dentre seus ambientes diversos de formação, um caso que vale ressaltar, são os depósitos de BIF do tipo Lago Superior, localizados na península superior de

Michigan, em que não estão associados a materiais vulcânicos extrusivos e são, portanto, interpretados como precipitados químicos de águas ricas em ferro em um mar raso (James, 1954), isso demonstra a variedade de tipos de formações.

As formações ferríferas mais antigas conhecidas, situam-se na Groenlândia, e datam de cerca de 3,8 bilhões de anos, associadas a processos de cratonização ocorridos durante o Éon Arqueano (Dymek & Klein, 1988). Contudo, foi no Éon Proterozoico que se estabeleceram os principais depósitos de ferro mundialmente conhecidos, destacando-se como o período em que se formaram as maiores concentrações de minério de ferro (Figura 1).

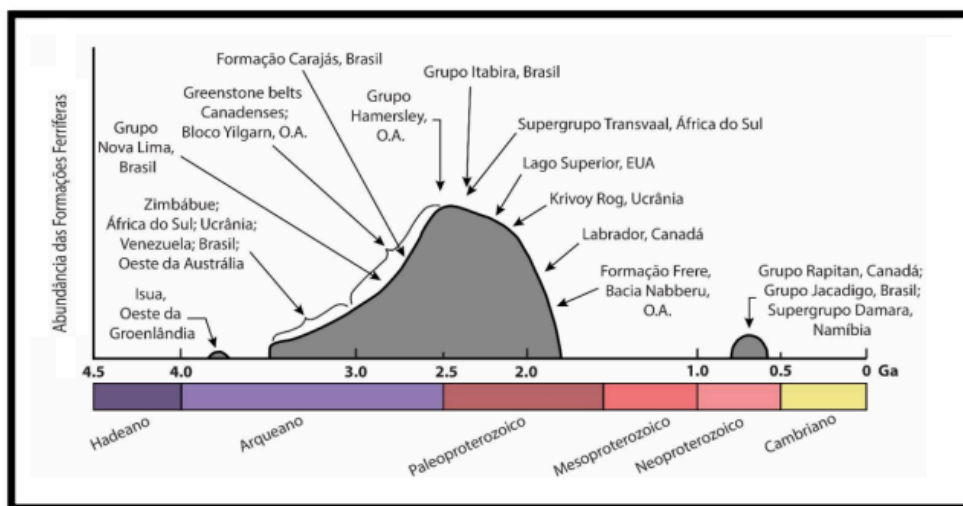


Figura 1: Principais formações ferríferas distribuídas segundo tempo geológico (modificado de Klein, 2005, apud Longo, 2023).

Depósitos de ferro do tipo vulcano-sedimentar e magmático, como os encontrados em Kiruna, na Suécia, caracterizam-se pela presença de magnetita associada à apatita e ocorrem em várias regiões do mundo. Esses depósitos foram formados desde o Proterozóico até períodos mais recentes, geralmente em ambientes onde houve resfriamento de magmas provenientes de rochas cálcico-alcalinas e levemente alcalinas. Já os depósitos de Lahn-Dill são tipicamente vulcano-sedimentares e consistem em formações predominantemente hemolíticas, encontradas em rochas do Devoniano e do Carbonífero Inferior. Os corpos minerais desses depósitos formam horizontes singenéticos dentro de sequências orogênicas e estão associados a rochas vulcânicas submarinas, que atuam como limites

naturais dessas formações.

Os depósitos formados por metamorfismo de contato, do tipo Skarn, são gerados pela intrusão de corpos ígneos dentro de camadas de rochas sedimentares carbonáticas no qual sofreu processo de diferenciação do líquido magmático enriquecido em minerais de minérios em contato. Sua idade é bem ampla, podendo variar desde o Arqueano até o Cenozoico.

Depósitos de ferro do tipo oolítico e pisolítico são considerados de menor relevância econômica, pois sua distribuição é mais limitada. A maior parte de suas reservas é encontrada em rochas da Era Paleozoica, embora esses depósitos tenham ocorrido em diversos períodos ao longo do tempo geológico. Eles geralmente se localizam próximos a depósitos com alto teor de ferro e resultam de processos de intemperismo e lixiviação em rochas ricas nesse elemento. Podem ocorrer em diferentes formas, desde blocos rolados até concentrações de ferro em paleocanais.

4.1.4 Depósitos do tipo Formações Ferríferas Bandadas (FFB)

Também conhecido como *Banded Iron Formations* (BIF's), são depósitos marcados muitas vezes por seu acamadamento, dado por camadas alternadas de algum mineral de ferro (carbonato, sulfeto ou óxidos) e sílica coloidal (*chert* ou jaspe). Estão distribuídos geograficamente e temporalmente em um amplo espaço de tempo geológico (Figura 1), desde os greenstone belts de c. 3,8Ga a c. 2,4Ga (Trendall, 2002; Klein, 2005) até depósitos mais atuais de 1-10Ma no Plioceno (Golubovskaya, 2001) e junto a isso, em ambientes de formação distintos, conferindo características texturais, mineralógicas e estruturais distintas, que possibilitam deduzir as condições ambientais e tectônicas presentes durante sua formação. Os modelos teóricos consideram os processos de formação tendo uma proveniência de origem sedimentar, além de processos hidrotermais e supergênicos associados.

O presente trabalho tem enfoque nos depósitos sedimentares acamadados ou formações ferríferas bandadas do tipo Lago Superior, no qual se trata de um dos tipos de deposição de minério de ferro mais significativos. Esse depósito tem como

fonte, além da atividade vulcânica, geralmente apresentada de forma mais distal, exalando diversos elementos, entre eles, alta quantidade de ferro, também possui uma associação com sedimentação química com uma fonte continental, um modelo esquemático, simplificado, está representado na Figura 2. Esse tipo de depósito se dá em plataformas continentais do tipo passiva, próximas à costa. Para a compreensão de forma geral das BIF's, entende-se que um intenso vulcanismo ocorreu há milhões de anos, mais especificamente no pré-cambriano e está diretamente correlacionado para a gênese das formações, que posteriormente sofrerão reações geoquímicas, gerando quatro fácies: sulfata, carbonatada, silicatada e oxidada. Sendo, a principal do sistema do tipo Lago Superior a face óxido. Para a geração desses óxidos de ferro, a que se deve o depósito em si, sua ocorrência se dá no período do Paleoproterozóico, cerca de 2.5Ga, conhecido como "O Grande Evento de Oxidação", sendo este, fundamental para a gênese das maiores formações ferríferas. Nesse episódio, a ação das cianobactérias já tinha início desde 2.8Ga realizando a fotossíntese, sendo assim, oxigenando o oceano.

Esse marco, faz com que a maior parte do ferro, que encontra-se supersaturado nos oceanos, liberada através de vulcanismo e fumarolas (*Black smoke*), sofra reações de REDOX, com uma faixa de Eh variando de 0.4 a 0.1, para a precipitação de óxido de ferro (hematita). Em condições de Eh de 0 a 0,8 se trata de condições redutoras, mais proximais da fonte exalativa, logo se precipita a face sulfetada. Em condições intermediárias, precipita-se o mineral de óxido de ferro magnetita (consiste em uma combinação de ferro ferroso (Fe^{2+}) e férrico (Fe^{3+}) e se forma em condições que variam de intermediárias a oxidantes), assim como o carbonato de ferro (siderita). Em 2.5Ga, com uma quantidade adequada de oxigênio disponível, ocorreu a precipitação de óxidos de ferro (hematita), importante mineral contendo em torno de 60% de Fe em sua estrutura. Esse tipo de formação serve como um modelo análogo ao que ocorreu na região de estudo, onde está localizado o Grupo Itabira, no Quadrilátero Ferrífero.

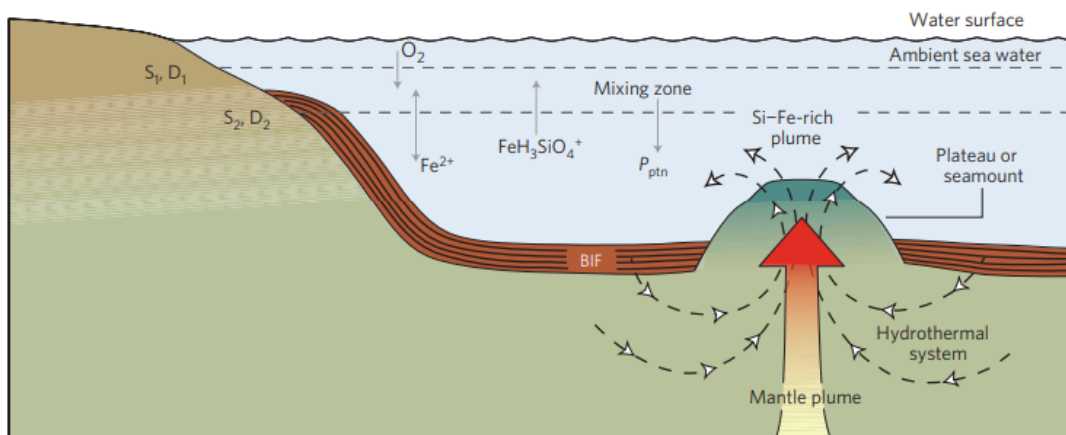


Figura 2: modelo esquemático das Formações Ferríferas Bandadas (FFB) (Extraído de Y.Wang, 2009).

Embora haja muitas discussões e controvérsias sobre o tema, existe um consenso em alguns pontos que destacam as formações ferríferas bandadas do Pré-Cambriano. Para a formação e precipitação, é necessário que algumas características prevaleçam, como: uma fonte de ferro (por exemplo, fumarolas) e um ambiente oxidante. Além disso, para as extensas formações do tipo Lago Superior, é provável que a ação tectônica no período seja ausente, e que a bacia de sedimentação não tenha elevado grau de inclinação. Assim, o depósito se desenvolve em uma zona de transição oceânica: nas regiões mais profundas, ocorrem exalações vulcânicas que liberam grandes quantidades de ferro, enxofre e sílica; enquanto nas áreas mais rasas, o ambiente é rico em oxigênio e apresenta alta atividade bacteriana. A área intermediária entre essas zonas torna-se ideal para a formação das formações ferríferas bandadas (BIFs), onde a deposição é influenciada por fatores físico-químicos, como temperatura, Eh e pH.

Em ambientes de plataforma, a porção mais profunda é próxima a condições redutoras e rica em Fe^{2+} , dando origem à fácies carbonática. Conforme a concentração de carbonato diminui, ocorre um aumento na quantidade de óxidos, criando uma progressão gradativa entre as fácies. Essa diferenciação em fácies dentro de um ambiente marinho é frequentemente marcada pela mudança do mineral predominante.

Em áreas mais distais e de ambiente redutor, o mineral presente é a pirrotita e pirita. Já a presença de hematita indica um ambiente mais oxidante, característico

de porções mais rasas, plataformais. A lâmina de água consiste em um papel fundamental para o depósito, pois ela funciona como uma espécie de “*trap*” para esse tipo de depósito, fazendo com que o material se resfrie, condense e precipite o mineral de ferro.

Sendo assim, podemos classificar os depósitos do tipo em:

- **Algoma:** são formações ferríferas que possuem um vínculo direto e intenso com atividade vulcânica ou vulcanismo máfico, ou seja, se formam mais proximais a sistemas exalativos. Sendo assim, é característico a presença de grande quantidade de pirrotita (sulfetos) assim como magnetita e carbonatos de ferro.
- **Plataformais:** de ambiente de plataforma passiva: sedimentos marinhos, marinhos rasos, ortoquartzitos, sedimentos bastante maduros. Se denomina como do tipo Lago Superior, estudos recentes apontam a participação hidrotermal, com vulcanismo associado a formação dessas bacias. Eles possuem forte vinculação química.
- **Rapitan:** menos expressivos, formaram-se em riftes cratônicos, caracterizados por rápido abatimento e extensão crustal, com adelgaçamento da crosta continental e ascensão do manto astenosférico. Esse processo gerou magmatismo básico e intensa atividade hidrotermal, com fumarolas em margens continentais e ambientes intra-cratônicos, datados do Neoproterozoico.

4.1.5 Quadrilátero Ferrífero

O Quadrilátero Ferrífero (Dorr, 1969) localiza-se na borda sul do Cráton do São Francisco (Almeida, 1977), e é um dos mais importantes e conhecidos domínios geológicos do Brasil. Esta região é constituída por rochas arqueanas, Supergrupo Rio das Velhas, e proterozoicas, Supergrupos Minas e Espinhaço.

O Quadrilátero Ferrífero é caracterizado pelo arranjo grosseiramente quadrangular (Figura 3), abrangendo uma área de 7.000 quilômetros quadrados no

centro de Minas Gerais, Brasil contendo sinclinais onde afloram sedimentos platformais do Supergrupo Minas, de idade Paleoproterozóica, separados por estruturas antiformais irregulares com terrenos arqueanos do tipo *greenstone* do Supergrupo Nova Lima, e domos de rochas cristalinas Arqueanas e Proterozóicas (Machado *et al.*, 1992) incluindo granito-gnaisses, metatonalitos a sienogranitos, pegmatitos, anfíbolitos, ultramáficas, além de supracrustais metamorizadas na fácies anfíbolito (Rosiére & Chemale, 2013). A região de estudo localiza-se na porção sudoeste do Quadrilátero Ferrífero (Figura 3).

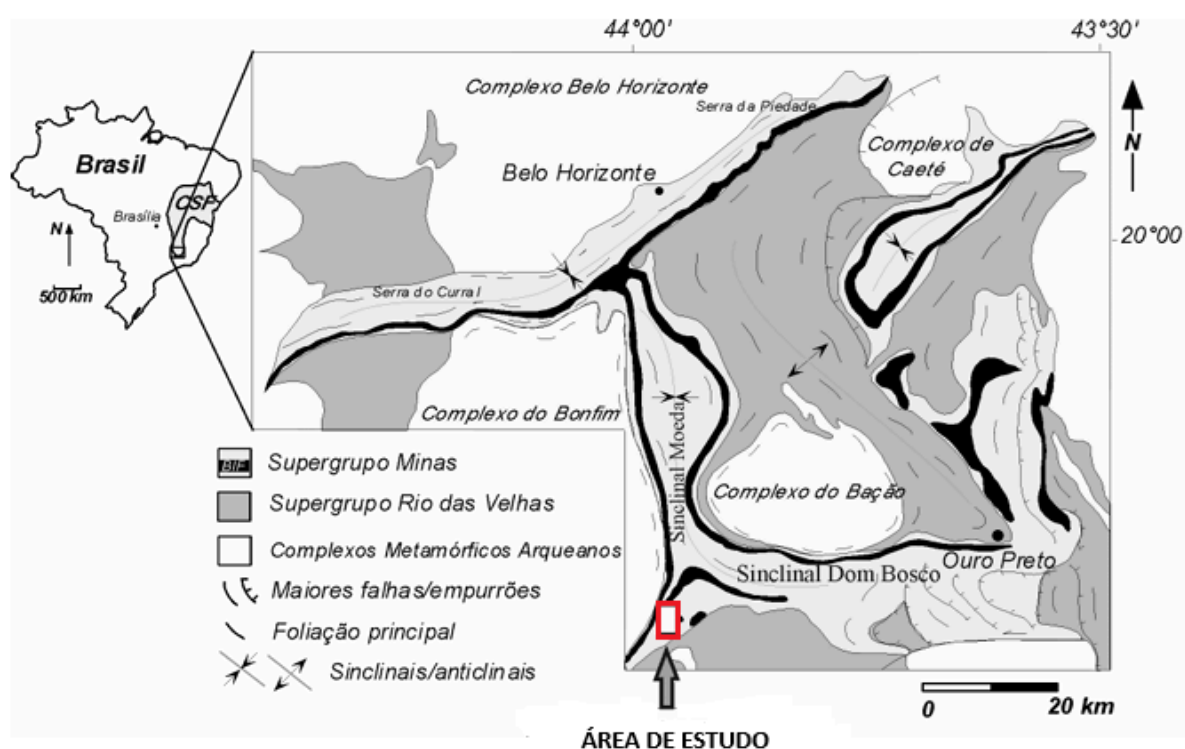


Figura 3: Mapa de Localização da área de estudo (extraído de Lagoeiro 2000, modificado de Dorr 1969, apud Trzaskos, 2011).

A sequência estratigráfica é representada na Figura 4 e pode ser classificadas em sete principais grupos, da mais antiga para a mais nova:

Embasamento cristalino, no qual teve sua formação entre 3,0 e 2,6 Ga e retrabalhado entre 2,22 – 2,05 Ga durante a orogênese Transamazônica, gerando a formação de domos que interseccionam a sequência crustal mais jovem. É

composto predominantemente por gnaisses do tipo TTG, bandados e migmatizados, de idade arqueana (Noce, 1998).

O Supergrupo Rio das Velhas é formado por rochas metassedimentares e metavulcânicas de idade arqueana, sendo dividido em dois grupos principais: Nova Lima e Maquiné. O Grupo Nova Lima é caracterizado por uma sequência de rochas verdes arqueanas (greenstone belt) depositadas em uma bacia marginal ativa. Essa unidade inclui rochas vulcânicas de composição ácida a intermediária, datadas em aproximadamente 2,77 Ga (Machado et al., 1989), além de rochas máficas a ultramáficas, como basaltos e komatiitos, sedimentos químicos, como formações ferríferas bandadas (FFB) e rochas carbonáticas, e rochas siliciclásticas (Dorr, 1969; Ladeira, 1980a, conforme citado em Klein & Ladeira, 2000). Já o Grupo Maquiné, composto por uma unidade molássica predominantemente quartzítica e metaconglomerática, é subdividido em duas formações: Palmital e Casa Forte (Dorr, 1969).

O Supergrupo Minas é subdividido em quatro unidades: o Grupo Caraça, Itabira, este, de maior interesse para a região de estudo, o Piracicaba e o Sabará (Dorr 1969). É formado por uma sequência de idade paleoproterozoica, composta predominantemente por rochas metassedimentares plataformais que encontra-se discordante sobre o Supergrupo Rio das Velhas.

O Grupo Caraça consiste em uma sequência clástica basal de origem aluvial, deltaica ou marinha rasa, composta predominantemente por conglomerados e quartzitos. Zircões detríticos encontrados na sequência inferior foram datados entre 2,59 e 2,56 Ga (Renger et al., 1994). Este grupo é subdividido nas formações Moeda e Batatal.

O Grupo Itabira corresponde a uma unidade de sedimentação química predominante na Bacia de Minas, com contribuição subordinada de sedimentos clásticos. Esse grupo está dividido nas formações Cauê e Gandarela (Dorr, 1969).

A Formação Cauê, em contato gradacional com a Formação Batatal, situada abaixo, é a principal unidade hospedeira de extensos volumes de formações ferríferas bandadas (FFBs) e corpos de minério na região. As FFBs desta formação, frequentemente denominadas itabiritos na literatura geológica do Quadrilátero Ferrífero, foram inicialmente descritas por Eschwege (1822). Esses itabiritos encontram-se metamorfizados e apresentam composições mineralógicas variadas,

caracterizadas pela alternância de camadas compostas por óxidos de ferro, como hematita e magnetita (quartzo-itabirito), dolomita (itabirito dolomítico) e anfibólio (itabirito anfibolítico) (Rosière & Chemale Jr., 2000; Spier et al.)

A Formação Gandarela estabelece um contato gradacional com a Formação Cauê (Dorr, 1969) e é composta predominantemente por rochas carbonáticas, incluindo calcários e dolomitos, além de apresentar filitos subordinados, metaconglomerados intraformacionais e camadas finas de itabiritos (Dorr, 1969). A idade de sedimentação dessa formação foi estimada em 2,42 Ga, com base em análises pelo método Pb-Pb em metacalcários estromatolíticos não deformados (Babinski et al., 1995). Com base nessa datação, os autores sugerem que a deposição das formações ferríferas (FFs) ocorreu por volta de 2,52 Ga, aproximadamente 100 milhões de anos antes do início da sedimentação da Formação Gandarela. Essa proposta considera a idade da Formação Gandarela como limite máximo para a deposição das FFs, associada a dados de zircões detríticos da Formação Moeda e à taxa de deposição típica para rochas sedimentares do Grupo Hamersley, na Austrália, estimada em 3 m/Ma.

O Grupo Piracicaba, que localmente apresenta contato erosivo com o Grupo Itabira, é constituído por rochas sedimentares clásticas, como pelitos e psamitos, além de rochas químicas, incluindo filitos carbonáceos e ferruginosos, dolomitos e formações ferríferas bandadas (FFB) (Dorr, 1969; Rosière & Chemale Jr., 2000). Sua idade de deposição é delimitada entre a Formação Gandarela e o Grupo Sabará, datado em 2,13 Ga pelo método U-Pb (Machado *et al.*, 1989). O grupo é subdividido nas formações Cercadinho, Fecho do Funil, Taboões e Barreiro (Dorr, 1969).

O Grupo Sabará repousa em discordância erosiva sobre o Grupo Piracicaba, e sua deposição é interpretada como sincrônica à orogênese Riacciana, conforme definido por Brito Neves (2011) e discutido por Alkmim & Marshak (1998). Esse grupo é composto por uma sequência de flysch, que inclui metagrauvas, filitos carbonáceos, metadiamicctitos, metaconglomerados e rochas metavulcânicas de composição félsica a intermediária (Dorr, 1969). A idade de sedimentação foi proposta por Machado et al. (1989) com base na datação de zircões detríticos em grauvas, sendo estimada em 2,13 Ga ou mais recente. O Grupo Itacolomi (Dorr, 1969) está em contato discordante, angular e erosivo sobre o Grupo Sabará, sendo a unidade mais jovem do Quadrilátero Ferrífero. Este grupo é interpretado como

uma sequência molássica, formada por quartzitos, metarcósios e metaconglomerados, frequentemente contendo seixos de formações ferríferas. Na sua base, encontra-se a Fácies Santo Antônio, caracterizada por metaconglomerados, quartzitos e filitos.

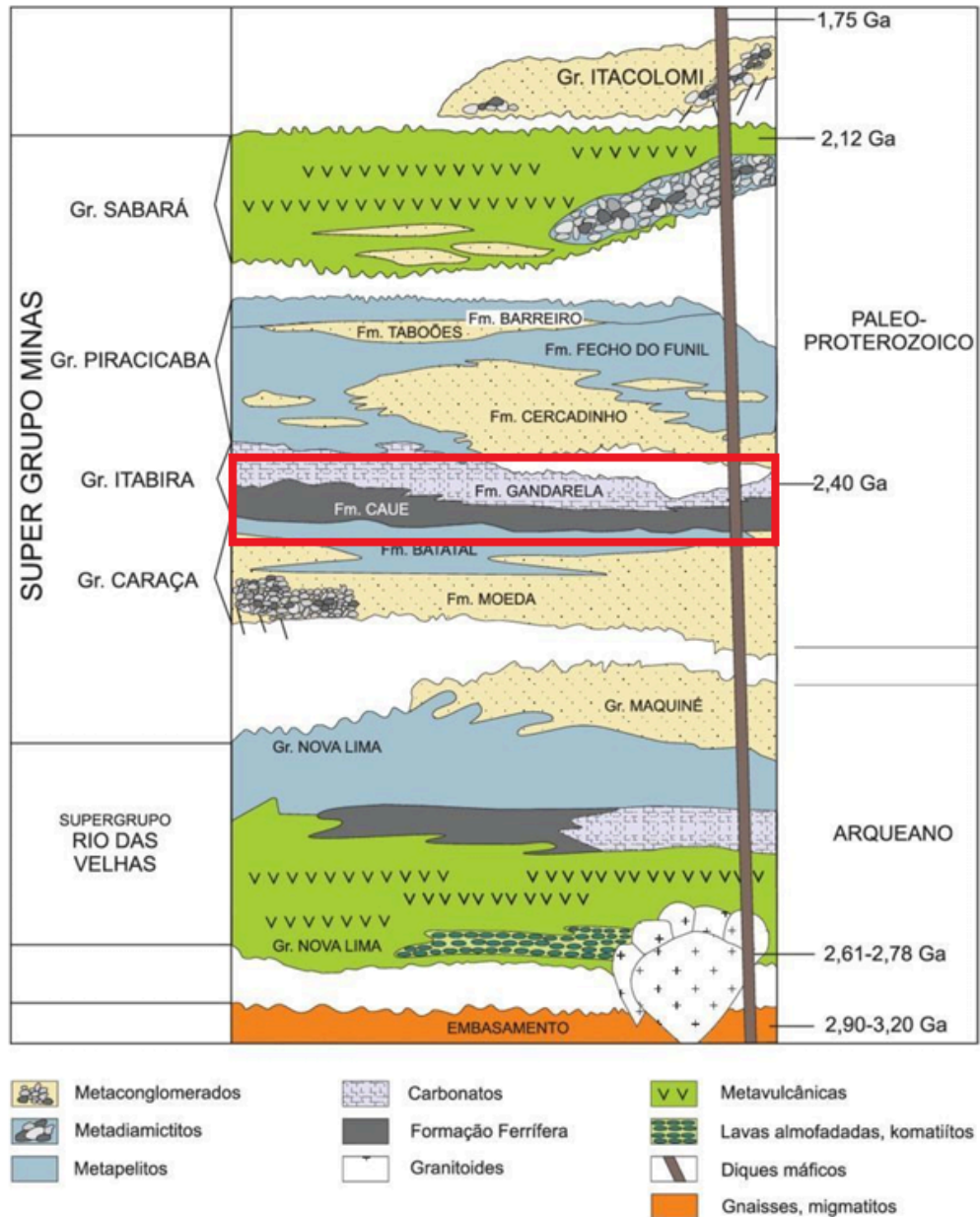


Figura 4: Coluna litoestratigráfica das unidades do QF com destaque para a Formação Cauê (modificado de Alckmin & Marshak, 1998).

4.1.6 Geologia da área em estudo

Na atual compartimentação da mina, que se encontra à sudoeste do Quadrilátero Ferrífero, possui separação de dois corpos principais supergênicos, chamados: Corpo Oeste e Corpo Principal, ambos hospedados na Formação Ferrífera Bandada Cauê (destacada na Figura 4), que está inserido no Grupo Itabira, incluído no Supergrupo Minas, de idade paleoproterozoica. Essa área é controlada por estruturas do tipo sinclinais, em que destacam-se duas principais, a sinclinal de Dom Bosco, de orientação geral E-W, e do Sinclinal da Moeda, cujo traço axial é aproximadamente N-S. Junto a isso, é recorrente grande número de falhas de empurrão e transcorrentes. Esse quadro de complexidade estrutural já havia sido enfatizado nos trabalhos pioneiros de Barbosa (1949) e Guimarães e Belezkij (1953) e, mais tarde, detalhado através da cartografia de Guild (1957) e Ladeira (1997).

O Supergrupo Minas é representado pelos grupos Caraça, Itabira e Piracicaba. A Formação Ferrífera Bandada Cauê se trata de uma unidade geológica de relevância no contexto do Quadrilátero Ferrífero. Ela é caracterizada por sua composição litológica predominantemente constituída por sequências de rochas ferríferas bandadas, sendo estas, itabiritos silicosos, carbonáticos, anfíbolíticos e manganésíferos, bem como minérios de ferro hematíticos. Essas rochas apresentam alternâncias de camadas de minerais de hematita, magnetita, sílica, e carbonatos, atribuindo uma aparência bandada distintiva (Figura 6). A mineralogia complexa e a estruturação de forma geral dessas formações são reflexos de processos deposicionais e sedimentares ocorridos em ambientes marinhos anóxicos durante o Paleoproterozóico, evidenciando a riqueza de informações paleoambientais preservadas.

De forma sucinta, a geologia da área de estudo tem como principais formações:

- **Grupo Nova Lima:** caracterizado por uma diversidade litológica que inclui quartzo-biotita-plagioclásio xisto, biotita-estaurolita-plagioclásio xisto, metachert, metatufos máficos, anfibólio xisto, quartzo-granada-xisto e clorita xisto.

- **Grupo Caraçá:** composto por quartzitos grossos de origem fluvial, quartzitos finos, filitos de origem transicional marinha, metaconglomerados e lentes de quartzito. As idades máximas de sedimentação foram determinadas pelo método U-Pb em zircão detrítico, variando de 2.677 Ma a 2.563 Ma.
- **Grupo Itabira:** Apresenta uma predominância de rochas químicas e carbonáticas, incluindo itabiritos, itabiritos anfíbolíticos e dolomíticos, mármore, mármore dolomítico, filitos e lentes de hematita.
- **Grupo Piracicaba:** constituído por uma ampla gama de litologias, como filitos, xistos, quartzo-mica xistos, sericita xistos, xistos grafitosos, quartzitos, quartzitos ferruginosos e mármore dolomítico.
- **Grupo Itacolomi:** inclui quartzitos com lentes de conglomerado, filitos e formações ferríferas. As idades máximas de sedimentação foram obtidas pelo método U-Pb em zircão detrítico, com resultados de 2.058 Ma e 2.059 Ma.

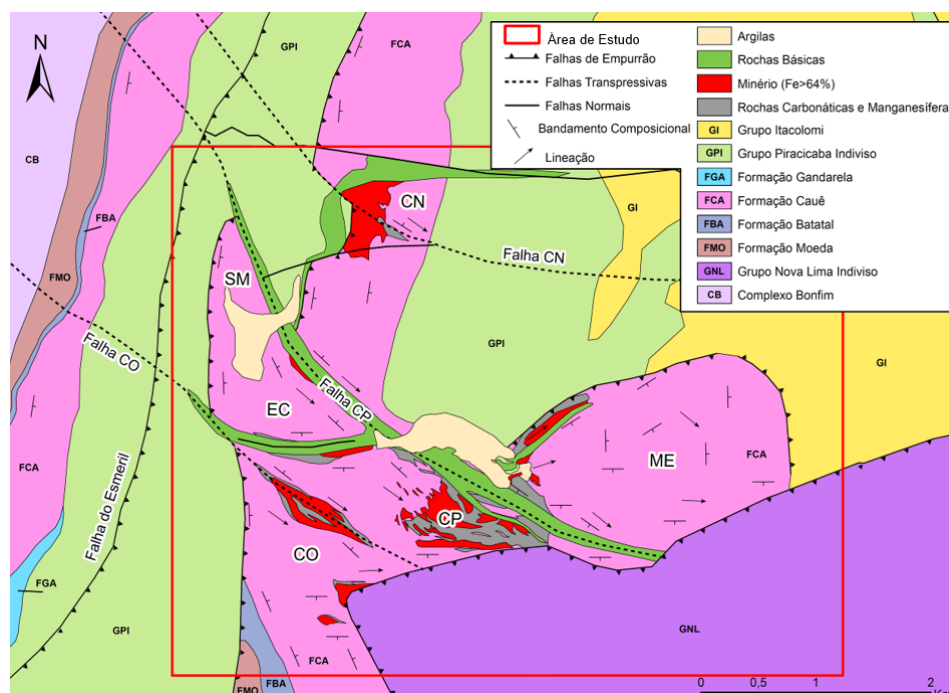


Figura 5: Mapa geológico da área de estudo, destacando formações e unidades do Supergrupo Minas, tipos de falhas e ocorrências de minério de ferro (>64% Fe). (Extraído de Silveira, V. D. et al. 2017)

Assim, é possível a partir da Figura 5, em que destaca a região de estudo pelo quadrado vermelho, abrangendo o Grupo Nova Lima no qual é composto

principalmente por xistos. O Grupo Caraça apresenta quartzito e filito em sua composição. O Grupo Itabira é formado por itabiritos, itabiritos carbonáticos, dolomitos, filitos dolomíticos, além de ocorrências de zonas manganésíferas. O Grupo Piracicaba inclui quartzitos e filitos ferruginosos. O Grupo Itacolomi é caracterizado por quartzitos grossos e metaconglomerados. As rochas intrusivas da região são representadas por metagabros, enquanto os sedimentos cenozoicos são compostos por cangas, lateritas e argilas.

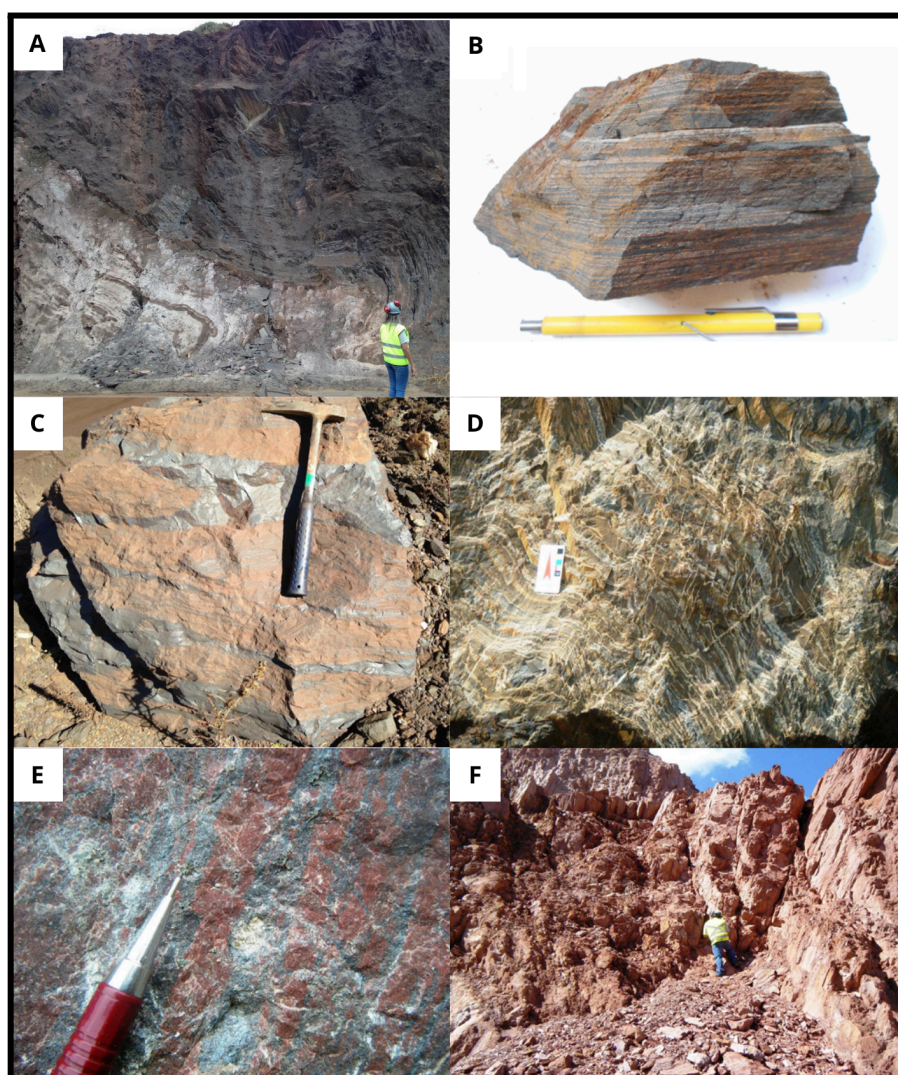


Figura 6: Imagens representativas da geologia local. (a) afloramento ressaltando contato entre itabirito de alto e baixo teor. (b) amostra de quartzito itabirito. (c) rocha de itabirito demarcando a intercalação de chert e ferro. (d) itabirito silicoso. (e) itabirito carbonático. (f) afloramento de xisto do Gr. Nova Lima, SG. Rio das Velhas.

4.2 Conceitos de Geoestatística

4.2.1 Estacionariedade

Conforme McLennan (2007), a predição de valores na geoestatística é fundamentada na decisão de estacionariedade, a qual assegura a homogeneidade geológica nos domínios definidos. Essa decisão é subjetiva e depende da avaliação do intérprete, pois a estacionariedade em geoestatística é uma hipótese.

A estacionariedade é uma propriedade de um modelo de função aleatória (Rossi; Deutsch, 2014). Ela refere-se a um fenômeno espacial que permanece relativamente constante ao longo do tempo e do espaço. Logo, ela apresenta valores constantes e momentos de covariância independentes.

Em geoestatística, a estacionariedade implica que as análises descritivas, como a média e a variância, são invariáveis a translação em h metros, ou seja, em um domínio estacionário, amostras separadas a h metros tem uma variância constante (onde h representa uma dada distância). Conforme h aumenta, a variância aumenta no domínio estacionário. Isso permite a aplicação de métodos geoestatísticos, como a krigagem (que não será o enfoque do trabalho no presente momento), que assume a estacionariedade para realizar estimativas ou previsões em locais não amostrados com base nas observações em locais amostrados. Além disso, vale ressaltar que a estacionariedade é muitas vezes uma simplificação ou uma suposição idealizada, já que na prática os fenômenos naturais podem exibir variações espaciais. Portanto, a decisão sobre a estacionariedade é uma consideração crítica na modelagem geoestatística e pode influenciar significativamente a precisão das estimativas realizadas.

4.2.2 Análise Univariada

A análise univariada é uma metodologia estatística essencial na geoestatística, principalmente na área da geologia, que visa examinar e compreender a distribuição e variabilidade de uma única variável em um conjunto de dados. Entretanto, essa técnica utiliza-se de procedimentos adequados para inferir individualmente sobre variáveis respostas desconsiderando qualquer estrutura de

relação importante, ou seja, não contempla a covariância (Coimbra *et al.* 2007). Este método se destaca por sua capacidade de proporcionar *insights* valiosos sobre a natureza intrínseca da variabilidade espacial de um fenômeno específico.

No caso de estudo, a análise univariada pode desempenhar um papel crucial na caracterização de parâmetros, como concentrações minerais, propriedades físicas, ou outras variáveis geológicas relevantes. Essa abordagem permitirá relacionar a distribuição espacial das variáveis, identificando padrões, anomalias e tendências que são fundamentais para a compreensão da área.

Análises como média, mediana, desvio padrão, assimetria e curtose, são frequentemente empregados na análise univariada. A média é uma medida central que representa o valor médio da variável, enquanto a mediana representa o valor central. O desvio padrão quantifica a dispersão dos dados em torno da média, indicando a variabilidade da variável. A assimetria e a curtose fornecem informações sobre a forma da distribuição e a presença de caudas longas ou picos pronunciados.

Ao aplicar a análise univariada em geoestatística, pode-se identificar padrões geoespaciais de forma mais simplificada. Além disso, a análise univariada é frequentemente precursora de técnicas mais avançadas, como a análise bivariada ou multivariada e a krigagem, que levam em consideração múltiplas variáveis e modelam a dependência espacial entre elas, que serão revistas no presente trabalho.

Sendo assim, a análise univariada desempenha um papel crucial na geoestatística aplicada à geologia, proporcionando uma base sólida para a compreensão da variabilidade espacial de variáveis geológicas importantes.

4.2.3 Análise Multivariada

Sabe-se que a análise multivariada é uma análise exploratória, devido a isso, deve-se ter cautela na utilização dessa ferramenta e a forma de abordagem da mesma. Antes de aplicar a análise, é preciso que se tenha conhecimento do objetivo da pesquisa, que no caso, se trata de uma possível compartimentação da área em estudo. Sabe-se também, que ao lidar com métodos geoestatísticos, e se tratando de análise multivariada, pode-se perder informação, pois estará reduzindo a dimensionalidade em geral reduzindo assim, um conjunto de dados. A denominação

“Análise Multivariada” corresponde a um grande número de métodos e técnicas que utilizam, simultaneamente, todas as variáveis na interpretação teórica do conjunto de dados obtidos (Neto, 2004), ou pelo menos aquelas que apresentam algum tipo de correlação.

Dentre as diversas técnicas multivariadas que podem ser usadas, pode-se destacar duas que terão maior relevância no contexto desse trabalho: a análise de agrupamento hierárquico e a análise fatorial com análise de componentes principais.

A AA (Análise de Agrupamento), constitui uma metodologia numérica multivariada, com o objetivo de propor uma estrutura classificatória, ou de reconhecimento da existência de grupos, objetivando, mais especificamente, dividir o conjunto de observações em um número de grupos homogêneos, segundo algum critério de homogeneidade (Regazzi, 2001).

A ACP (Análise de Componentes Principais) representa uma abordagem na análise multivariada, permitindo a exploração de conjunto de dados extensos. Com ela, há a vantagem de não haver perdas significativas de informações, pois se trata de uma técnica matemática, utilizando um grande número de dados. Essa técnica também possibilita a identificação das medidas responsáveis pelas maiores variações entre os resultados, transformando um conjunto original de variáveis de informações. Além disso, realiza uma transformação do conjunto original de variáveis para outro conjunto conhecido como Componentes Principais (CP), mantendo as dimensões equivalentes. Essa transformação visa preservar ao máximo a informação, como citado anteriormente, enquanto elimina variáveis originais com baixo conteúdo informativo. Essa redução só é viável quando as variáveis são independentes e apresentam coeficientes de correlação não nulos. Esta técnica vem sendo estudada por autores como Morrison (1976), Seber (1984), Reinsel (1993), Jackson (1980, 1981) e Johnson & Wicheran (1992, 1998).

4.2.4 Continuidade Espacial

Apesar dos fenômenos geológicos apresentarem alguma variabilidade espacial, é possível perceber uma certa conectividade espacial. Essa conectividade pode variar em escala e direção quando analisada de forma espacial. Uma observação em um ponto pode indicar informações sobre os valores nos pontos

vizinhos, possibilitando a análise da continuidade de maneira matemática, estatística ou a ausência de continuidade. A relação e a presença de anisotropia, ou seja, variações diferenciadas em diferentes direções, também são consideradas (Figura 8). Além disso, examina-se se os dados apresentam algum padrão espacial, identificando escalas características e compreendendo seu significado. Essa abordagem, conhecida como análise de continuidade espacial na geoestatística, visa responder a essas questões e outras relacionadas, utilizando ferramentas como o variograma (Figura 7), para descrever estatisticamente como o fenômeno se diferencia conforme a distância entre os pontos aumenta. O variograma é uma ferramenta básica de suporte que permite representar quantitativamente a variação de um fenômeno regionalizado no espaço (Huijbregts, 1975).

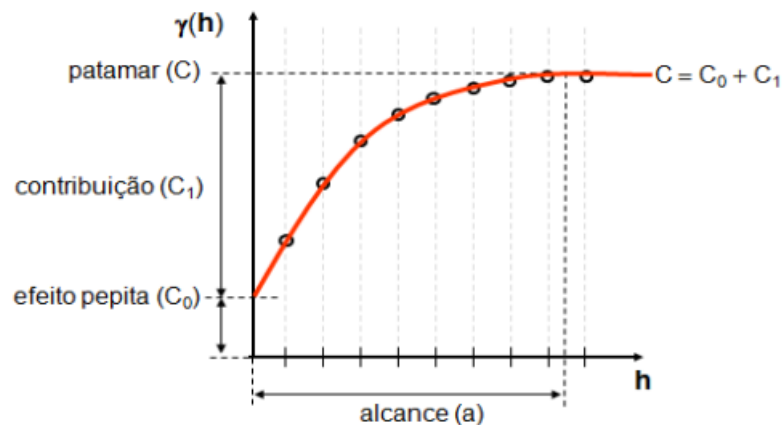


Figura 7: representação de um semivariograma destacando seus principais parâmetros (Extraído de F.F Batista, 2012).

Em que:

- i. **Alcance (Range):** se trata da distância dentro da qual os valores amostrais apresentam-se correlacionados espacialmente. Ou seja, é a distância máxima em que a correlação entre os pontos amostrados é observada.
- ii. **Efeito Pepita (Nugget Effect):** é o valor da semivariância para distância zero, representa a descontinuidade do semivariograma para distâncias menores do que a menor distância entre as amostras. Essa variação depende da amostragem e da variabilidade intrínseca do fenômeno analisado.

- iii. **Patamar (Sill):** é o alcance máximo. É o valor do semivariograma quando o valor atingido por $\hat{\gamma}(h)$ quando a distância entre os dados h , cresce. Deste ponto em diante, considera-se que não existe mais dependência espacial entre as amostras (F.Batista, 2012).
- iv. **Contribuição:** é a diferença entre os valores do patamar (C) e do Efeito Pepita (Co).

A sua definição matemática é a metade da diferença quadrática esperada entre funções aleatórias emparelhadas (FRs) (Matheron, 1965). Em que $Z(x)$ e $Z(x+h)$, onde estas funções são separadas pelo vetor distância e direção (considerando a anisotropia) ou distância h , conforme a equação:

$$\gamma(\mathbf{h}) = \frac{1}{2} E[\{Z(\mathbf{x}) - Z(\mathbf{x} + \mathbf{h})\}^2]$$

Para variáveis contínuas, a semivariância experimental é definida como a metade da diferença média ao quadrado entre valores separados por uma determinada distância h . Dessa forma, o variograma experimental $\hat{g}(h)$ pode ser obtido a partir de $i = 1, 2, \dots, P(h)$ pares de observações $\{z(x_i), z(x_i+h)\}$ em locais $\{x_i, x_i+h\}$ separados por uma distância fixo h , conforme a equação:

$$\hat{\gamma}(\mathbf{h}) = \frac{1}{2P(\mathbf{h})} \sum_{i=1}^{P(\mathbf{h})} [z(x_i) - z(x_i + \mathbf{h})]^2$$

Em que $\hat{\gamma}(\mathbf{h})$ é o estimador da semivariância na distância \mathbf{h}

E $P(\mathbf{h})$ é o número de pares de pontos separados entre si por uma distância \mathbf{h} .

Um modelo matemático pode ser ajustado ao variograma, e os coeficientes desse modelo podem ser utilizados para atribuir pesos ótimos para a predição espacial utilizando a técnica de Krigagem. O modelo ajustado deve ser condicionalmente negativo semi-definido (Journel and Huijbregts, 1978). O modelo é

escolhido mais convenientemente a partir de um conjunto de modelos autorizados ou permitidos que atendam a esse requisito. McBratney and Webster (1986) apresentaram uma revisão de alguns modelos autorizados comumente utilizados.

Outro fator relevante para a análise de continuidade espacial é a anisotropia. O fenômeno é dito anisotrópico quando possui continuidade espacial com alcances diferentes, dependendo das direções. A figura 8 abaixo apresenta o caso isotrópico (mesma continuidade em todas as direções) e anisotrópicas (diferentes continuidades em diferentes direções). Vale ressaltar que a anisotropia, quando existente, se apresenta em direções perpendiculares entre si.

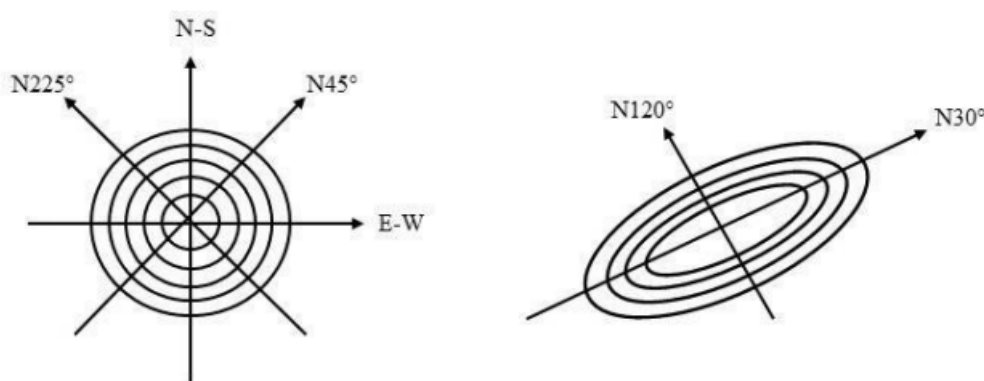


Figura 8: arranjos ilustrando dois fenômenos espaciais: o da esquerda isotrópico e o da direita anisotrópico (Modificado de Yamamoto, 2013, p.34 *apud* A.D.Reis, 2014)

4.2.5 Ponderação pelo Inverso da Distância

A interpolação pelo método *Inverse Distance Weighting* (IDW) ou Ponderação pela Distância Inversa é uma técnica muito utilizada para estimar valores em pontos não amostrados, em que é aplicado a uma grade regular tridimensional superposta a um depósito, onde cada bloco é estimado independentemente de um grupo de dados próximos selecionados com base em critérios relativos, baseando-se na proximidade de pontos medidos, ao ponto ou bloco que está sendo estimado e a quantidade de dados desejada para uma estimativa individual. Esse método parte da premissa de que valores mais próximos têm maior influência na estimativa do que valores mais distantes, refletindo a ideia de que fenômenos espaciais tendem a ser mais semelhantes em áreas adjacentes. Nesse método, a estimativa de um valor em

um ponto não amostrado, X_p é obtida a partir de uma média ponderada dos valores amostrados X_i com os pesos atribuídos inversamente proporcionais à distância entre o ponto de previsão e os pontos não amostrados. A equação do IDW é expressa da seguinte maneira:

$$X_p = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d_i^2} \cdot X_i \right)}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d_i^2} \right)}$$

Onde:

X_p é a variável interpolada;

X_i é o valor da variável da i-ésima localidade vizinha;

d_i é a distância euclidiana entre o i-ésimo ponto de vizinhança e o ponto amostrado;

Essa técnica de estimativa não leva em consideração as características espaciais do fenômeno e pode gerar discontinuidades quando o ponto estimado estiver na mesma posição física de uma amostra, mas é útil em muitos casos onde a krigagem não pode ser aplicada.

5 BANCO DE DADOS

Os dados utilizados pertencem à região do Quadrilátero Ferrífero e foram gerados a partir de sondagens acumuladas ao longo de 60 anos. Este banco de dados é multivariado, contendo diversas variáveis associadas a diferentes elementos e suas tipologias.

De acordo com relatórios internos da empresa, os dados do projeto incluem 33 tipologias, das quais 19 são classificadas como estéril e 14 como minério. As tipologias de minério identificadas são: HBA (hematita branda), HCP (hematita compacta), ICR (itabirito compacto rico), IBR (itabirito brando rico), IBS (itabirito brando silicoso), ICS (itabirito compacto silicoso), ICC (itabirito compacto carbonático), IBM (itabirito brando manganésífero), ICM (itabirito compacto manganésífero), IBG (itabirito brando goethítico), ICG (itabirito compacto goethítico), CEL (colúvio/elúvio), CGM (canga de minério) e BRS (brecha sedimentar mineralizada). Neste trabalho, as simulações foram realizadas com as tipologias identificadas como hematita e itabiritos.

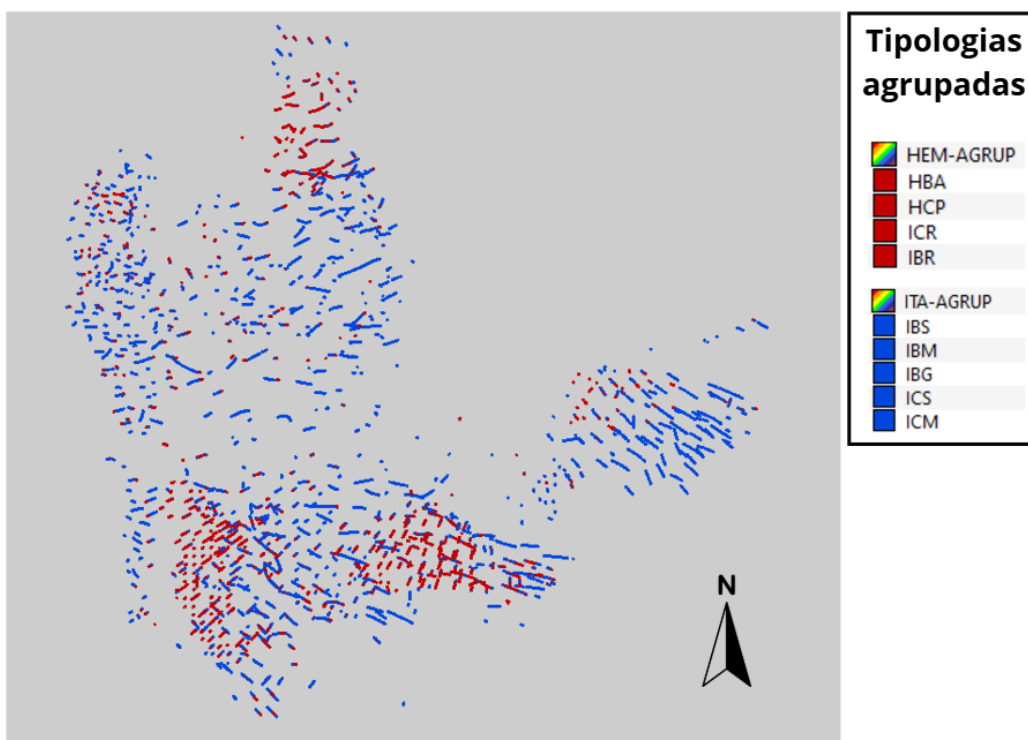


Figura 9: Mapa de tipologias agrupadas. Em azul, itabiritos e em vermelho hematitas.

O processo de agrupamento das litologias (Figura 9) é realizado num contexto, tanto de simplificação da análise geoestatística, bem como elimina o ruído de processos secundários na análise de proposta nesse estudo. As tipologias definidas na mina muitas vezes misturam conceitos, como compacidade ou faixa de teores específicos para determinados elementos. Como o propósito é analisar como a estrutural está correlacionada com a distribuição geoquímica de ferro, a simplificação foi necessária.

6 METODOLOGIA

6.1 Revisão Bibliográfica

Durante o trabalho, foi realizado um levantamento bibliográfico da área em estudo, se tratando, de forma geral, do Quadrilátero Ferrífero, localizado em Minas Gerais, mais precisamente na porção sudoeste, na qual abrange a Formação Ferrífera Bandada Cauê. O trabalho contou principalmente com dissertações na porção da área estudada, além de monografias e teses. Para o estudo da geologia em geral, utilizou-se além de artigos. Além disso, estudos realizados previamente sobre geoestatística e análise multivariada foram fundamentais para a compreensão e realização do trabalho, contando assim, com a cadeira de Fundamentos de Geoestatística bem como a de Modelagem Numérica Geológica.

6.2 Análise Exploratória de Dados (EDA)

Também conhecido como EDA (*Exploraty Data Analysis*) é a primeira etapa do projeto, no qual o trabalho será realizado através de um banco de dados empregado na área de estudo mencionada, que consiste em 705 furos de sondagem diamantada, abrangendo um total de 6500 amostras. A estrutura do banco de dados é composta por três tipos principais de arquivos: *collar*, *survey* e *assay*. Esses arquivos desempenham funções específicas na representação dos furos e de sua localização no espaço geográfico.

O arquivo *collar* é responsável por retratar a posição inicial dos furos na topografia original. Por outro lado, o arquivo *survey* contém informações cruciais, tais como o mergulho (*dip*), o azimute de mergulho (*dip azimuth*) para cada amostra, e a profundidade do furo (*depth*). Esses dados são fundamentais para a determinação da localização tridimensional dos furos no espaço.

Os dados presentes na base de dados de ensaios (*assay*) englobam as informações do estudo, as quais dizem respeito às leituras geoquímicas intervalares de furo a furo. Essas leituras são provenientes de ensaios laboratoriais certificados para 10 teores globais principais: Fe_GL, CaO_GL, Al₂O₃_GL, MgO_GL, Mn_GL,

P_GL, SiO2_GL, TiO2_GL, perda por calcinação (“PPC_GL”) e recuperação (“Re_GT65c”). Todas as variáveis representadas pelos teores em cada amostra são expressas como variáveis contínuas em porcentagem, sendo o teor associado a cada amostra em cada furo.

Além das informações geoquímicas, o arquivo *assay* também inclui a variável categórica "lito", que representa as litologias definidas com base em critérios geoquímicos e geológicos.

A partir desse banco de dados, foi possível realizar a confecção de variogramas, usando o *software* isatis.neo. Através dele, carregando o banco de dados, já é possível ter uma análise visual primeiramente das amostras.

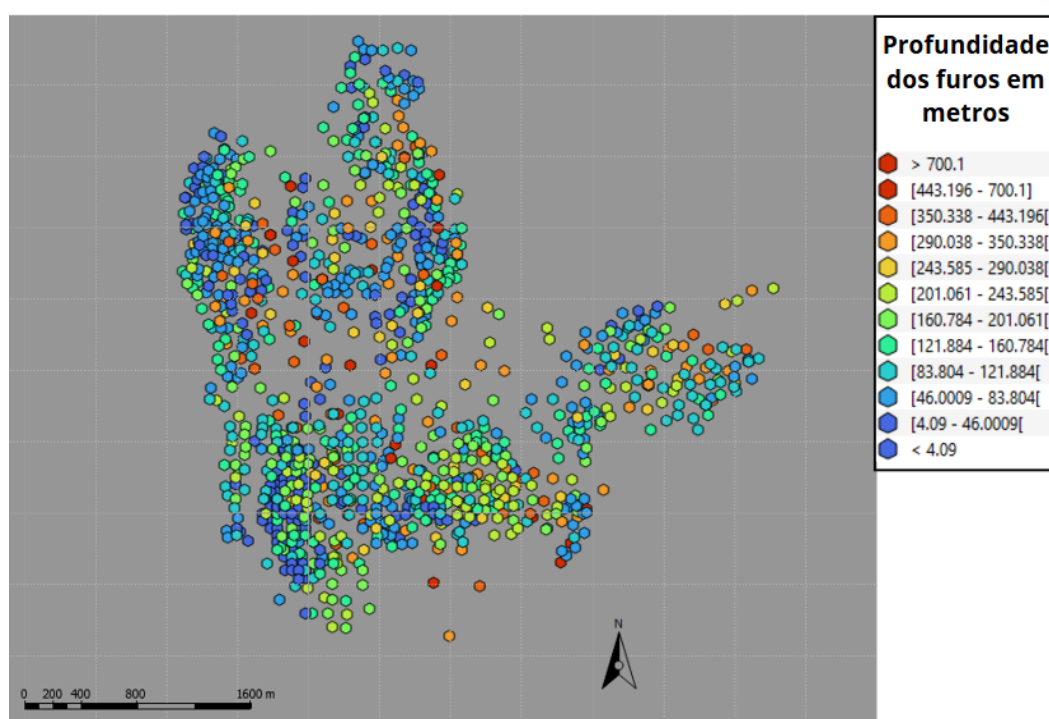


Figura 10: Mapa de distribuição espacial dos furos de sondagem e suas profundidades em metros.

Após isso, na ferramenta “EDA (*Exploratory Data Analysis*)” do *software* se tem acesso a uma série de mecanismos possíveis para geração de dados geoestatísticos, dentre eles, o variograma. Nessa parte, pode-se ter acesso a variografia experimental, nuvem variográfica, variáveis gaussianas, e opções de krigagem e modelagem variográfica bem como covariogramas ou correlogramas. Foi

confeccionado a variografia experimental, do tipo multidirecional, analisando os parâmetros de continuidade espacial. Esses parâmetros podem demonstrar se os dados possuem comportamento anisotrópico, ou seja, não há correlação em determinada direção ou isotrópico, em que não há correlação em determinada direção a partir das curvas geradas pelos variogramas. Além disso, também foi trabalhado com os dados estruturais (Figura 11).

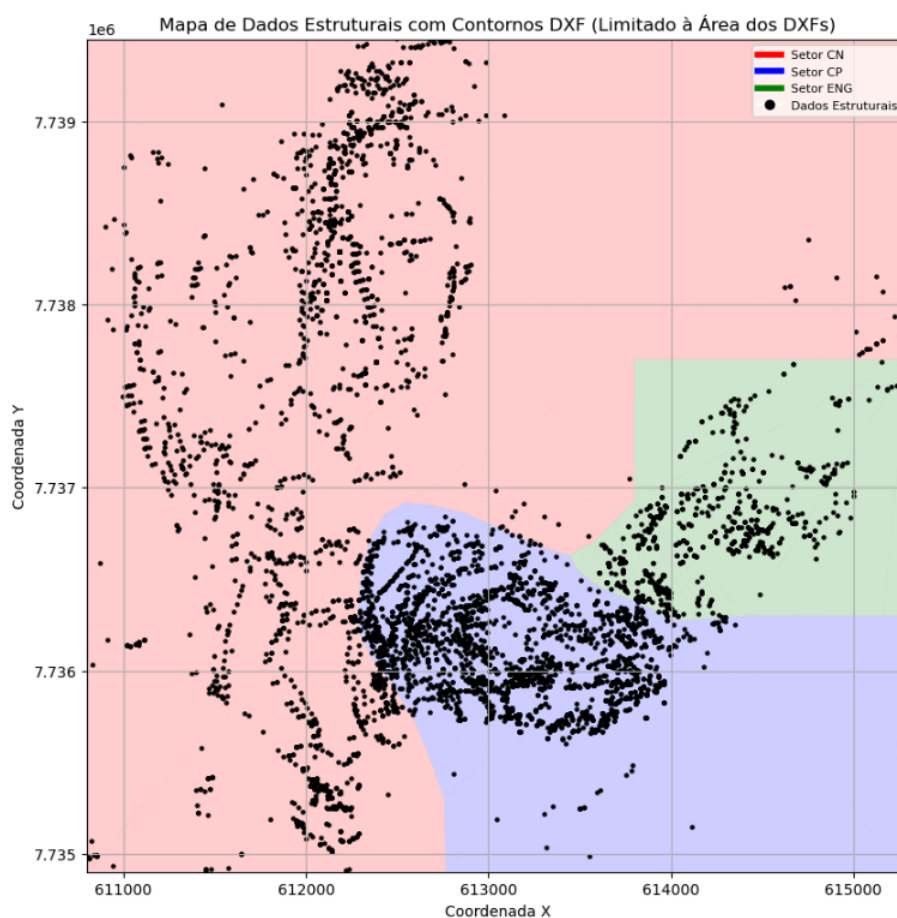


Figura 11: Mapa de dados estruturais com contornos DXF, destacando os setores CN, CP e ENG, delimitados nas cores vermelha, azul e verde, respectivamente, e os pontos de dados estruturais plotados na área dos DXFs.

Os dados estruturais disponíveis são de caráter superficial e, portanto, não fornecem uma resposta definitiva sobre o comportamento em subsuperfície, uma vez que podem ter sido sujeitos a alterações ao longo do tempo devido a processos geológicos ou intempéricos. No entanto, esses dados desempenham um papel

importante em análises preliminares, oferecendo informações iniciais que podem guiar a interpretação estrutural.

Além disso, os dados superficiais podem servir como base para uma reinterpretação estrutural mais consistente, especialmente quando integrados a informações obtidas por meio de sondagens, cuja execução está prevista para ocorrer em um futuro próximo. A combinação dessas diferentes fontes de dados permitirá uma caracterização mais precisa do comportamento estrutural em subsuperfície, reduzindo incertezas e aprimorando o modelo geológico.

6.3 Variografia

O variograma experimental expressa uma função discreta que descreve a continuidade espacial de uma variável regionalizada através da direção e da distância. Sendo assim, é possível representar uma medida de dissimilaridade espacial entre os pontos de dados expressa como uma função da separação crescente entre eles, que é calculado como metade da diferença ao quadrado entre os valores dos pontos separados por essa distância. O variograma teórico baseia-se na hipótese intrínseca, que define o tipo de estacionariedade e se fundamenta em duas suposições: a primeira assume que a variância dos incrementos é finita, enquanto a segunda estabelece que a média dos incrementos é invariante em relação a qualquer translação é igual a zero. Esses conceitos permitem modelar a continuidade espacial de forma detalhada, facilitando análises geoestatísticas e previsões.

Outra forma de abordagem, trata-se do variograma multidirecional, podendo fornecer informações sobre a continuidade espacial entre diversas direções, sem privilegiar ou restringir o cálculo a uma orientação específica. Sendo assim, é possível verificar padrões globais de variabilidade espacial quando se trata de anisotropias que não estão tão ressaltadas ou evidentes, sendo o caso em questão. O variograma multidirecional é amplamente utilizado como uma ferramenta inicial para avaliar as propriedades espaciais de uma variável regionalizada.

6.4 Clustering por K-Means

O algoritmo K-Means é uma técnica de aprendizado não supervisionado amplamente aplicada em problemas de clusterização, especialmente quando não se dispõe de dados rotulados. Seu principal objetivo é dividir um conjunto de dados em grupos (ou clusters), de modo que os elementos dentro de cada grupo sejam mais semelhantes entre si do que em relação aos elementos de outros grupos. O "K" no nome do algoritmo se refere ao número de clusters a serem identificados. O processo inicia com a seleção aleatória de K centros, conhecidos como centroides, e, em seguida, ajusta-se esses centroides de forma iterativa até que se encontre a melhor separação dos dados.

O funcionamento do K-Means é baseado em duas etapas principais: atribuições e atualização. Na etapa de atribuição, cada ponto de dados é associado ao centroide mais próximo, formando os clusters iniciais. Na etapa de atualização, os centroides dos clusters são recalculados com base na média dos pontos atribuídos a cada um. Esse ciclo de atribuição e atualização se repete até que os centroides se estabilizam, ou seja, até que as mudanças nos centroides se tornem insignificantes, o que indica que os clusters foram bem definidos.

Uma das vantagens do K-Means é a sua simplicidade e eficiência, características que possibilitam sua aplicação em grandes volumes de dados. Contudo, ele apresenta algumas limitações, como a necessidade de determinar previamente o valor de K e a sensibilidade a dados com formatos complexos ou a presença de outliers.

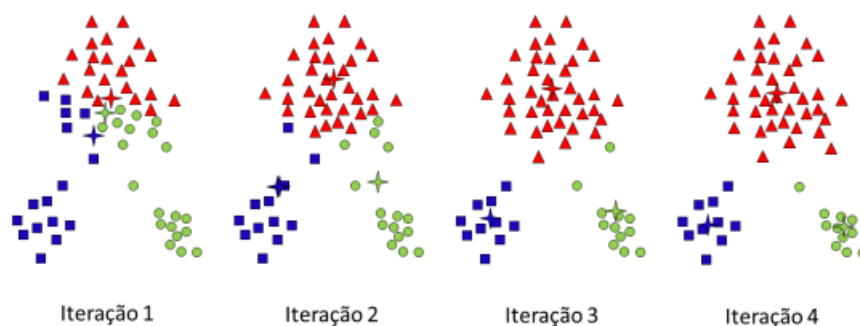


Figura 12: Representação do funcionamento do método k-means para definição de três grupos (adaptado de Tan et al. (2006). (Extraído de Moreira, 2020).

7. RESULTADOS

7.1 Análise Exploratória dos Dados : estatística básica e multivariada

A primeira etapa em uma análise geoestatística de qualquer fenômeno geológico é a compreensão de sua natureza por meio de análises estatísticas, com o objetivo de definir domínios estacionários. A estacionariedade é um pressuposto fundamental na geoestatística, pois garante que as variáveis estudadas possam ser modeladas de forma consistente em uma determinada região geológica.

Apesar de não ser um processo trivial, um ponto de partida comum é a identificação de múltiplas populações estatísticas em histogramas. Quando um histograma apresenta uma distribuição multimodal, isso indica a presença de diferentes populações ou domínios estacionários. Para avaliar essa característica, foi gerado inicialmente o histograma da variável **teor de ferro**, sem qualquer segmentação por litotipos (Figura 13). A análise desse histograma revelou a presença de **duas populações estatísticas distintas**, sugerindo que diferentes domínios poderiam estar presentes.

Para validar essa hipótese, foi realizada uma análise espacial da localização dessas duas populações. A compartimentação espacial identificada confirmou a existência de dois domínios geológicos distintos, que podem ser correlacionados com os **macrodomínios de hematita e itabirito**. Esses domínios apresentam comportamentos geoquímicos e geológicos distintos, refletindo diferentes processos de formação mineralógica e, conseqüentemente, características de teores de ferro diferenciadas.

Essa etapa inicial é crucial, pois a correta identificação e delimitação de domínios estacionários garantem uma modelagem geoestatística mais robusta. Além disso, possibilita a aplicação de técnicas específicas para cada domínio, como variografia separada, interpolação e estimativas mais precisas, considerando as particularidades de cada população. O histograma do Fe pode ser visto na Figura 13.

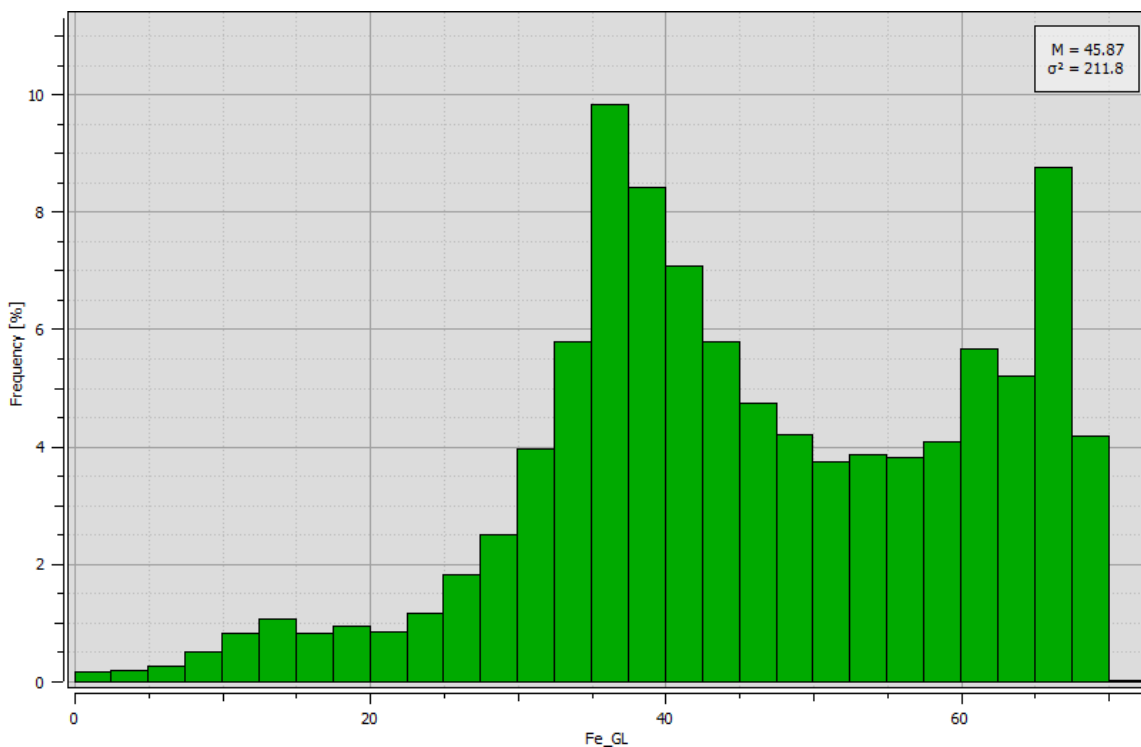


Figura 13: Histograma da variável Fe_GL sem qualquer segmentação por litotipos.

Assim, a análise preliminar demonstrou que:

1. O histograma da variável ferro apresentou um comportamento multimodal, evidenciando múltiplas populações.
2. A compartimentação espacial confirmou que essas populações possuem delimitações claras no espaço.
3. Os domínios identificados correspondem, de forma preliminar, às principais unidades geológicas **hematita e itabirito**.

Esse processo inicial de identificação e caracterização dos domínios estacionários é essencial para o desenvolvimento de modelos geoestatísticos mais precisos, permitindo a compreensão detalhada da variabilidade espacial dos teores de ferro e sua relação com os diferentes tipos litológicos, o resultado da compartimentação pode ser visto abaixo

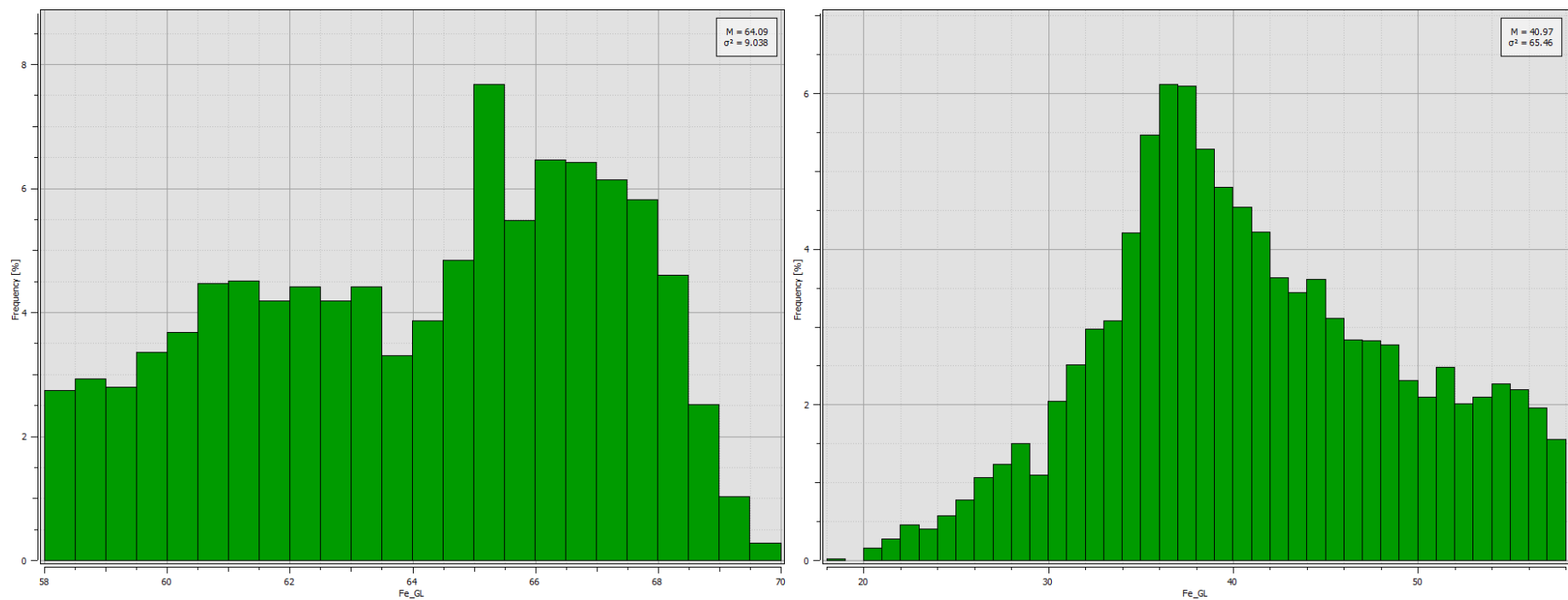


Figura 14: Histograma das hematitas (esquerda) e dos itabiritos (direita), referentes ao setor CN.

Tabela 5: Valores de estatística descritivas do teor (Fe_GL) referentes ao histograma gerado acima do setor CN.

Histograma (Fe_GL)	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação	Variância
Hematita	58.00	69.71	64.09	3.01	0.04691	9.038
Itabirito	18.64	57.99	40.97	8.09	0.1975	65.46

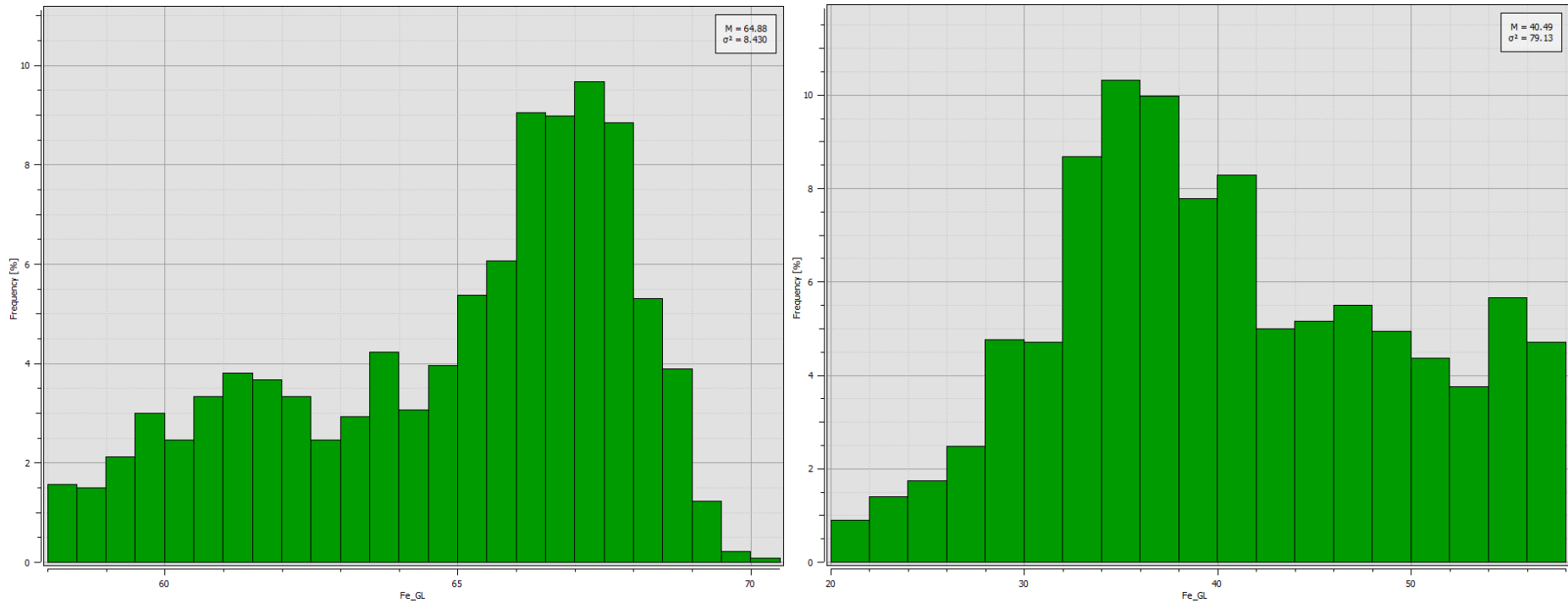


Figura 15: Histograma das hematitas (esquerda) e dos itabiritos (direita), referentes ao setor CP.

Tabela 6: Valores de estatística descritivas do teor (Fe_GL) referentes ao histograma gerado acima do setor CP.

Histograma (Fe_GL)	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação	Variância
Hematita	58.00	70.20	64.88	2.90	0.04475	8.430
Itabirito	20.08	57.95	40.49	8.90	0.2197	79.13

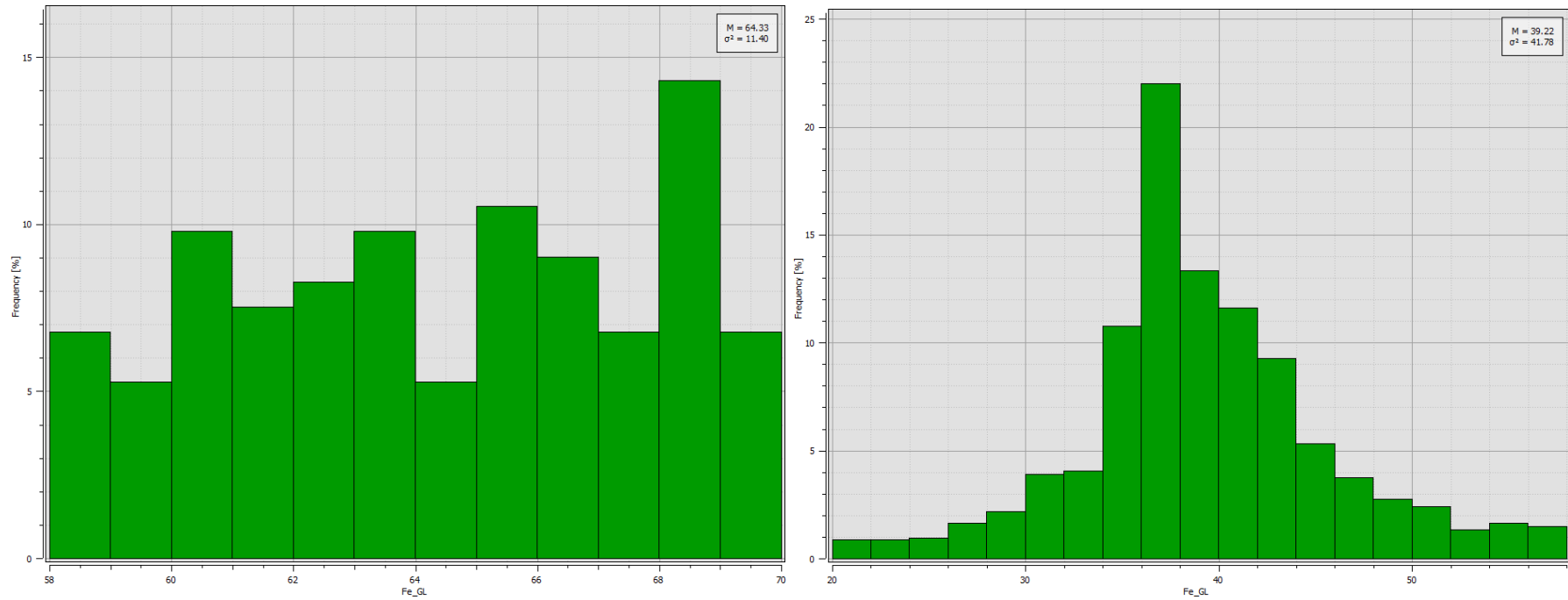


Figura 16: Histograma das hematitas (esquerda) e dos itabiritos (direita), referentes ao setor ENG.

Tabela 7: Valores de estatística descritivas do teor (Fe_GL) referentes ao histograma gerado acima do setor ENG.

Histograma (Fe_GL)	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação	Variância
Hematita	58.10	69.90	64.33	3.38	0.05249	11.40
Itabirito	20.10	57.83	39.22	6.46	0.1648	42.78

Apesar de alguns dos macrodomínios ainda apresentarem um comportamento multimodal, optou-se por não realizar novas subdivisões neste momento. A decisão foi baseada na necessidade de garantir maior robustez ao banco de dados, evitando fragmentação excessiva das amostras, o que poderia comprometer a representatividade estatística de cada domínio.

Manter os domínios menos subdivididos preserva a quantidade de dados disponíveis para as análises subsequentes, especialmente para a caracterização da continuidade espacial por meio de variografia e modelagem geoestatística. Subdivisões adicionais, embora possam proporcionar uma segmentação mais refinada, poderiam introduzir incertezas devido à redução do número de dados em cada subconjunto, prejudicando a qualidade das estimativas e a estabilidade dos modelos gerados.

Dessa forma, ao optar por domínios mais amplos, busca-se um equilíbrio entre a homogeneidade estatística necessária e a quantidade de dados suficiente para análises robustas de continuidade espacial. Esse critério é particularmente relevante em processos de modelagem geoestatística, onde um número inadequado de amostras pode resultar em variogramas instáveis ou interpretações imprecisas da estrutura espacial das variáveis.

7.2 Análise de continuidade espacial

A análise de continuidade espacial é o pilar da geoestatística, pois permite quantificar a regionalização das variáveis. O princípio fundamental é que amostras mais próximas entre si tendem a ser mais similares, enquanto amostras distantes apresentam maiores diferenças, até o ponto de completa desconexão. Essa continuidade está intrinsecamente relacionada aos processos de formação do fenômeno geológico, refletindo tanto as condições deposicionais quanto os controles estruturais que influenciam a distribuição das variáveis.

Os variogramas são as principais ferramentas para a análise de continuidade espacial e estão diretamente relacionados aos domínios estacionários, que, por sua vez, estão vinculados aos processos geológicos. Portanto, a divisão de domínios para fins de estimativa não deve ser feita de maneira arbitrária, mas sim embasada em um estudo detalhado das características geológicas, geoquímicas e estruturais

do depósito.

Neste estudo, parte-se da hipótese de que os teores de ferro estão associados, predominantemente, às BIFs (*Banded Iron Formations*) e ao comportamento estrutural do depósito. Assim, os variogramas da variável ferro devem refletir as estruturas geológicas presentes em subsuperfície. Variogramas com comportamentos de continuidade semelhantes podem indicar domínios estruturais equivalentes, que, portanto, podem ser agrupados para a estimativa, garantindo maior coerência nos modelos geoestatísticos.

Por outro lado, se um domínio apresentar um comportamento espacial significativamente distinto, ele não deve ser agrupado com os demais. A inclusão indevida de domínios com características espaciais discrepantes pode comprometer a qualidade das estimativas, introduzindo vieses e aumentando as incertezas associadas ao modelo.

Dessa forma, a definição dos domínios estacionários deve ser cuidadosamente estudada, levando em consideração a natureza geológica e estrutural do depósito, de modo que os variogramas resultantes respeitem e representem adequadamente o comportamento espacial das variáveis analisadas.

No total, foram elaborados **seis variogramas experimentais**, desenvolvidos com base no **agrupamento prévio dos litotipos** de interesse, especificamente **hematitas**, com altos teores de ferro, e **itabiritos**, que apresentam teores médios em torno de 50% de ferro. Esses agrupamentos foram fundamentais para estruturar o fluxo de trabalho em cada setor, garantindo uma análise direcionada e consistente das propriedades espaciais dos dados, ao mesmo tempo em que respeitam as características geológicas específicas de cada litotipo.

A **modelagem dos variogramas experimentais** foi realizada com o objetivo de identificar a continuidade espacial das variáveis químicas e compreender as **direções principais de anisotropia** associadas aos diferentes litotipos. Esse processo permitiu avaliar a influência dos controles deposicionais e estruturais no comportamento espacial dos teores de ferro.

Os resultados evidenciaram **orientações distintas** para hematitas e itabiritos, refletindo as diferenças nos processos de formação e na estruturação geológica desses litotipos. Enquanto as **hematitas** apresentaram continuidade espacial mais pronunciada em determinadas direções, possivelmente controladas por estruturas

de deformação e enriquecimento, os **itabiritos** exibiram padrões de continuidade mais difusos, associados à natureza estratiforme e à distribuição heterogênea dos teores.

Esses resultados reforçam a importância do agrupamento adequado dos litotipos para a construção de variogramas confiáveis e a definição de domínios estacionários consistentes, assegurando que as características anisotrópicas dos dados sejam devidamente capturadas no modelo geoestatístico. A partir dessa análise, é possível direcionar estratégias mais precisas de interpolação e estimativa, que respeitem a **variabilidade espacial** e as peculiaridades geológicas de cada domínio, sendo eles:

- **Setor Corpo Principal:** Hematitas: 025/0 e Itabiritos: 032/20
- **Setor Corpo Norte:** Hematitas: 023/30 e Itabiritos: 023/30
- **Setor Engenho:** Hematitas: 135/20 e Itabiritos: 157/0

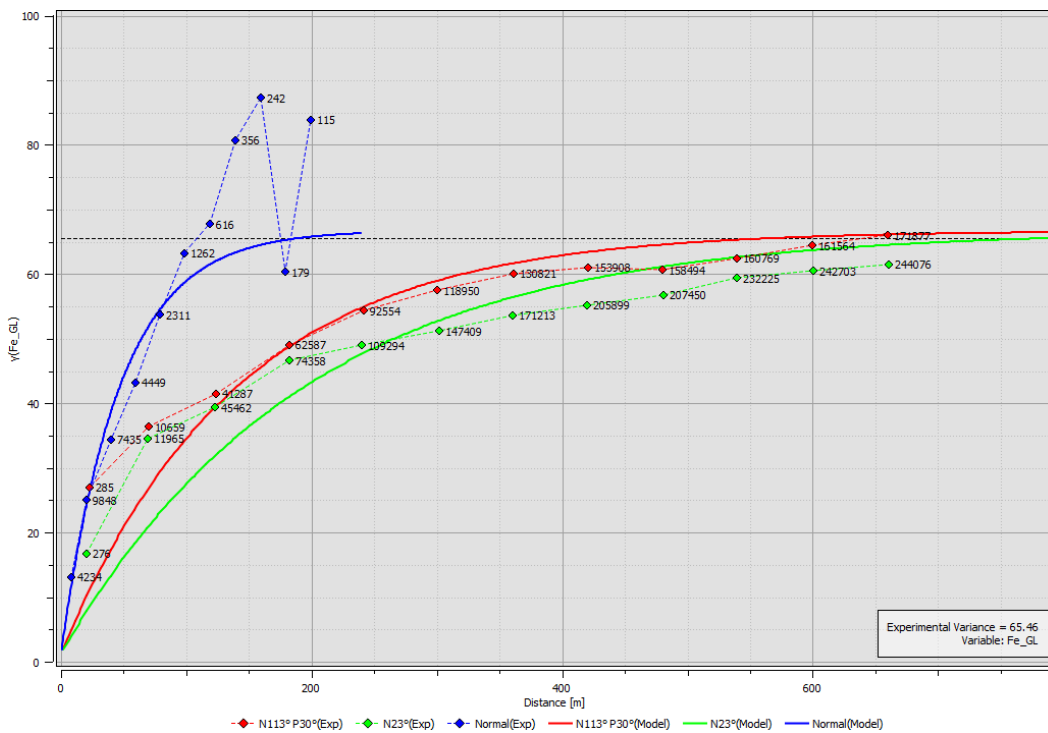
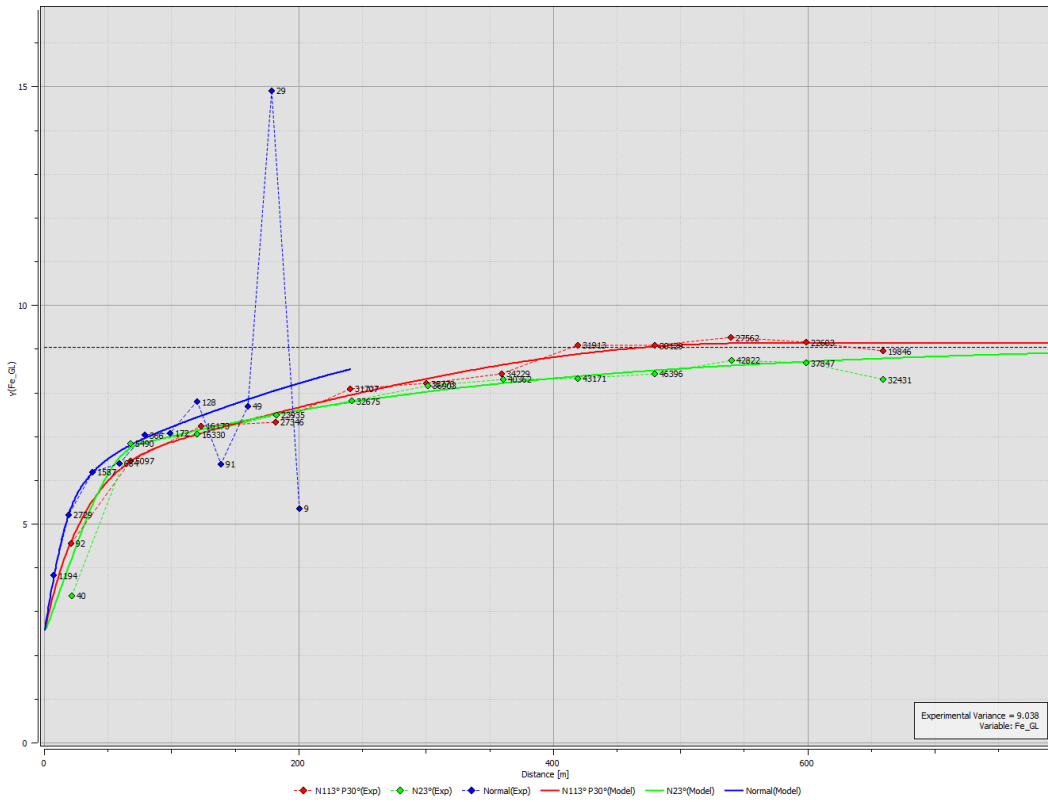


Figura 17: Variogramas referentes ao setor Corpo Norte (CN), acima das hematitas e abaixo para itabiritos.

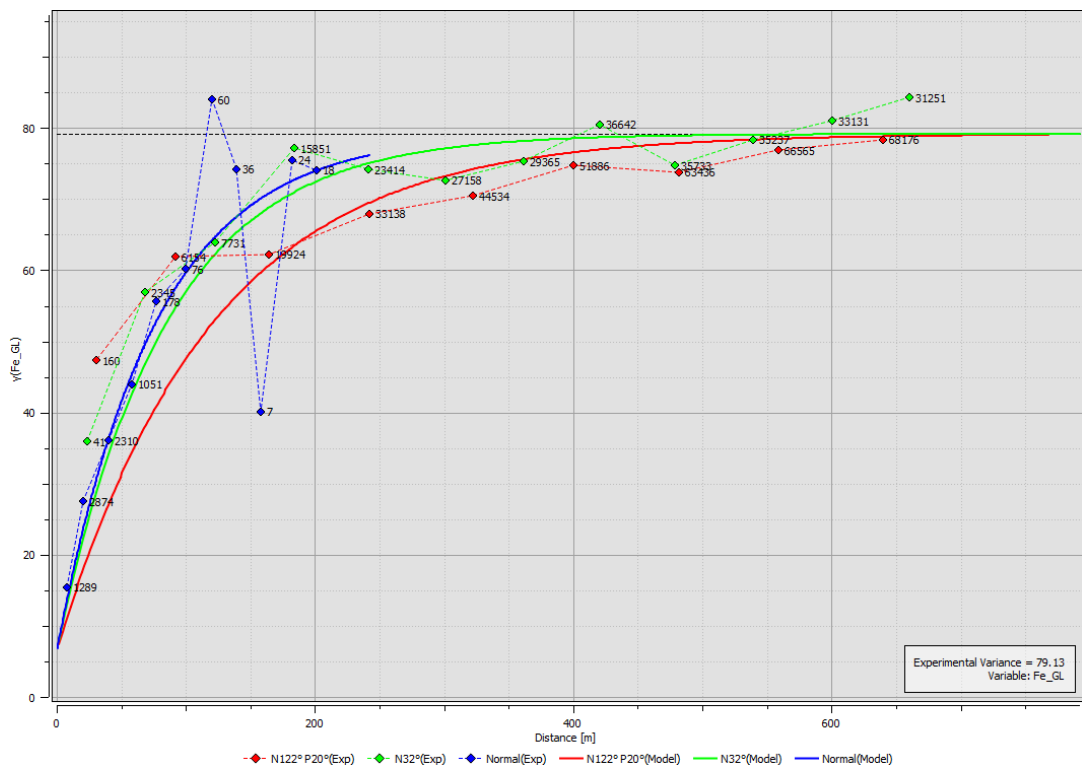
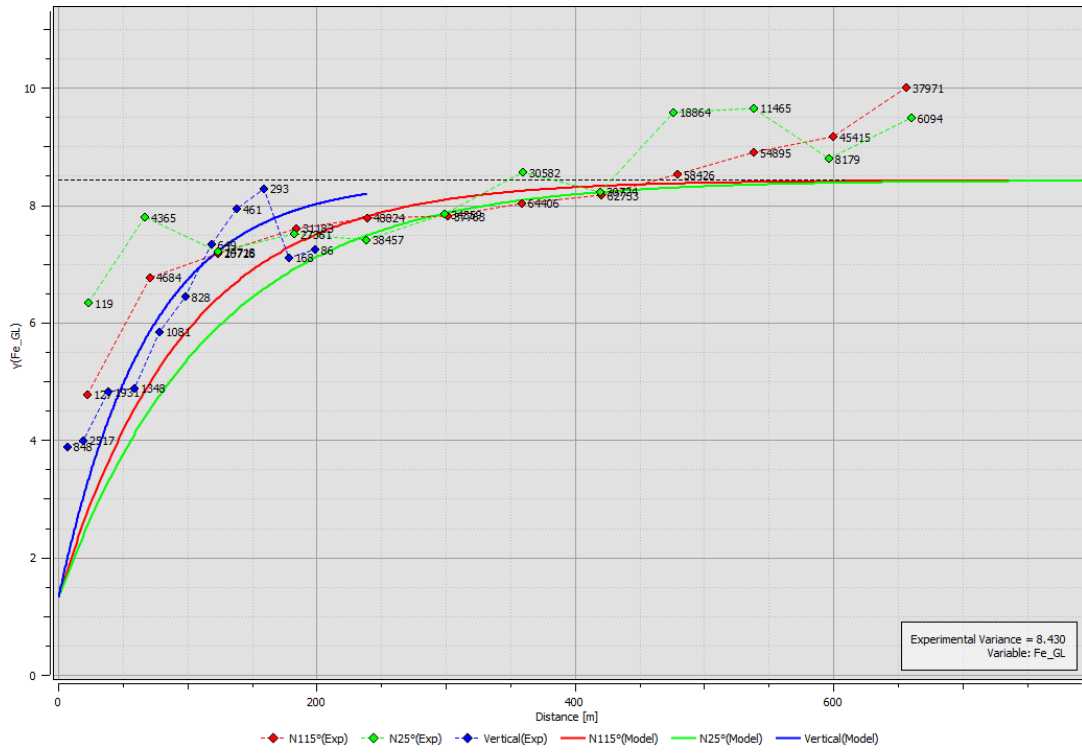


Figura 18: Variogramas referentes ao setor Corpo Principal (CP), acima das hematitas e abaixo para itabiritos.

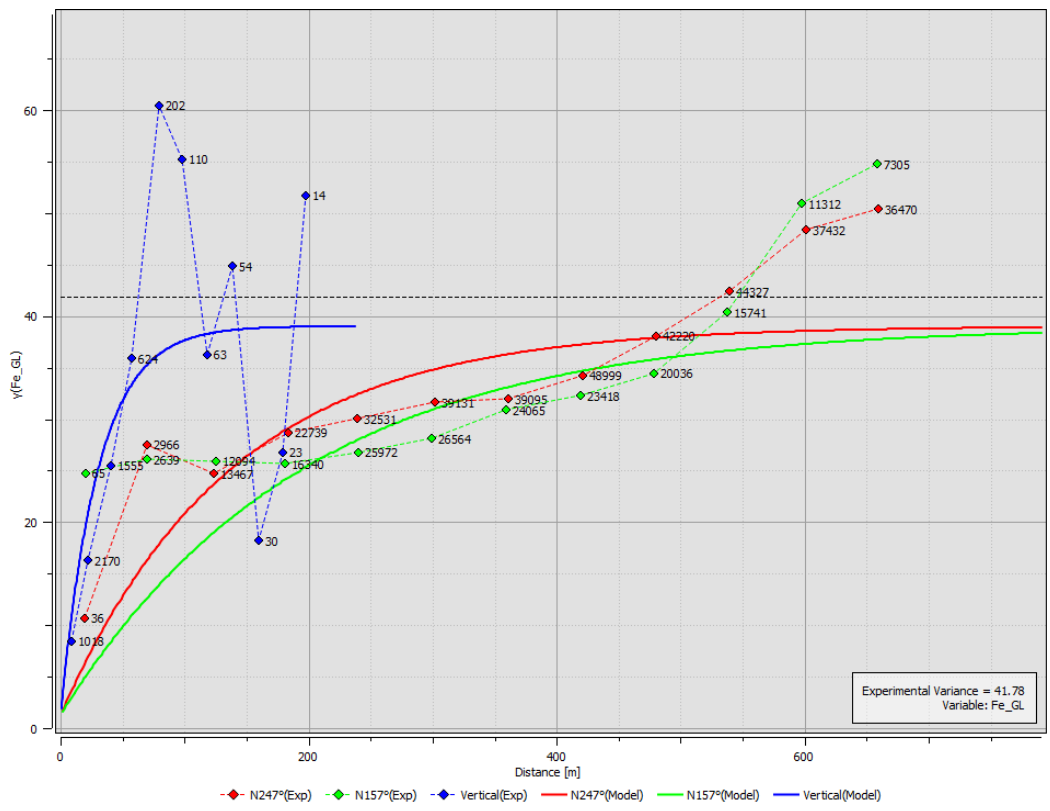
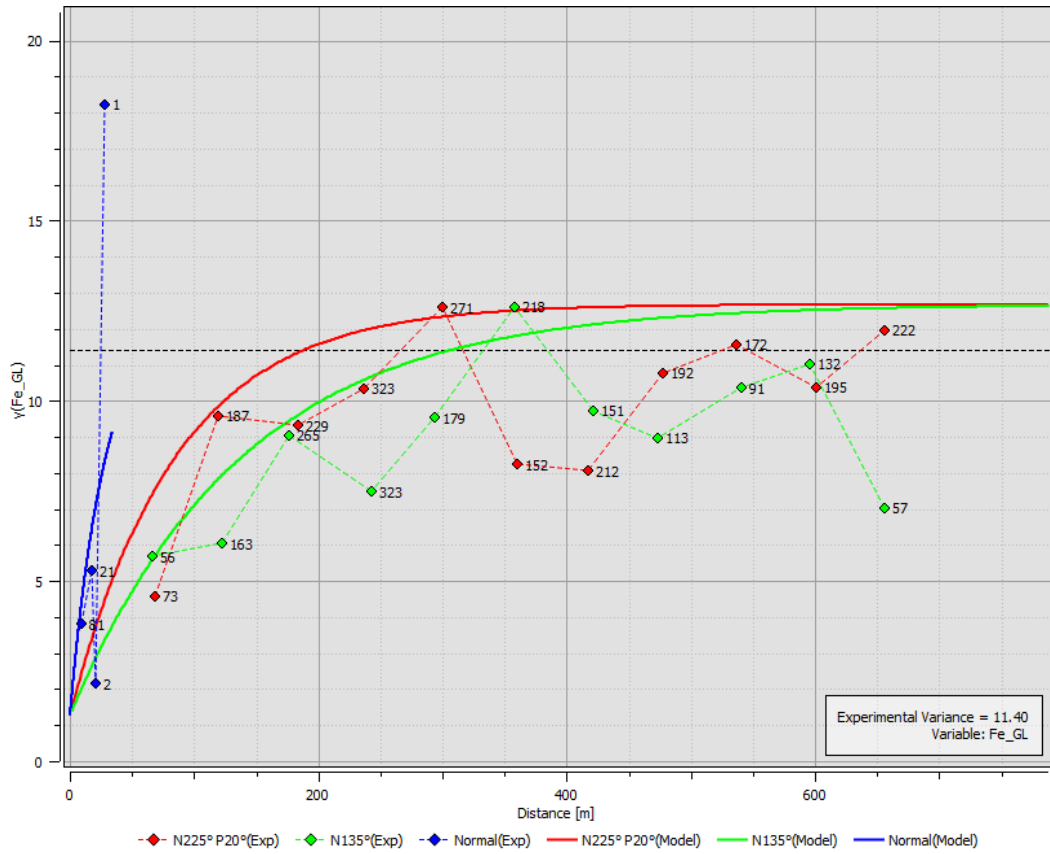


Figura 19: Variogramas referentes ao setor ENG, acima das hematitas e abaixo para itabiritos.

Tabela 8: Valores da análise variográfica multidirecional para os setores CN, CP, e ENG.

Setor	Domínio	Modelo	Azimute	Mergulho (°)	Parâmetro	Efeito Pepita	Alcance Estrutura 1 (metros)	Alcance Estrutura 2 (metros)
Corpo Norte	Hematitas	esférico	113	30	Sill	2.44	4	4
					Maior alcance		100	182.65
					Alcance intermediário		200	353.63
					Menor alcance		50	116.31 m
	Itabiritos	Esférico	113	30	Sill	2.35	30	31
					Maior alcance		150	322.63
					Alcance intermediário		250	353.63
					Menor alcance		80	116.31

Setor	Domínio	Modelo	Azimute	Mergulho (°)	Parâmetro	Efeito Pepita	Alcance Estrutura 1 (metros)	Alcance Estrutura 2 (metros)
Corpo Principal	Hematitas	Esférico	115	20	Sill	2.44	4	4
					Maior alcance		100	182.65
					Alcance intermediário		200	353.63
					Menor alcance		50	116.31
	Itabiritos	Esférico	122	20	Sill	2.35	30	31.04
					Maior alcance		150	322.63
					Alcance intermediário		250	353.63
					Menor alcance		80	116.31

Setor	Domínio	Modelo	Azimute	Mergulho (°)	Parâmetro	Efeito Pepita	Alcance Estrutura 1 (metros)	Alcance Estrutura 2 (metros)
Engenho	Hematitas	Esférico	225	20	Sill	2.44	4	4
					Maior alcance		100	182.65
					Alcance intermediário		200	353.63
					Menor alcance		50	116.3
	Itabiritos	Esférico	247	0	Sill	2.35	30	31.04
					Maior alcance		150	322.63
					Alcance intermediário		250	353.63
					Menor alcance		80	116.31

A análise de continuidade espacial nos domínios revelou que os domínios Corpo Norte e Corpo Principal apresentaram variogramas bastante semelhantes, tanto em termos de direção quanto de alcance. Considerando que a estacionariedade é uma hipótese simplificadora e que variações locais, assim como variações estruturais, são esperadas em sistemas geológicos complexos, é natural a ocorrência de pequenas diferenças entre os variogramas.

Por outro lado, o domínio Engenho apresentou um comportamento espacial significativamente distinto em relação aos demais, como já era previsto devido às suas características geológicas particulares.

Dessa forma, conclui-se que os domínios Corpo Norte e Corpo Principal podem ser considerados como uma única unidade para o processo de estimativa, dado o comportamento espacial semelhante observado. Já o Engenho, por apresentar um comportamento espacial diferenciado, deve ser tratado de forma independente, com um processo de estimativa separado, a fim de respeitar suas características específicas e garantir a robustez do modelo geoestatístico final.

7.3 Análise Multivariada (Machine Learning) de Dados Estruturais de Superfície

Para a análise de dados estruturais, foi utilizado um banco de dados proveniente de mapeamento estrutural de superfície, com medidas de *dip* e *azimuth* de foliações (SN) e bandamentos (S0), realizadas em campo sob rochas que passaram por processos de alteração supergênica podendo, então, encontrar-se alterada. Apesar das limitações presentes, a técnica aplicada representa uma etapa inicial e auxiliar para o estudo, tendo potencial de validação em trabalhos futuros nos quais serão utilizados dados de subsuperfície.

Os valores de *dip* e *azimuth* foram submetidos a um processo de interpolação baseado no método de *Inverse Distance Weighting* (IDW), para isso, houve a transformação matemática de dados direcionais, de coordenadas polares para cartesianas. Este tratamento é essencial para lidar com a natureza angular dos dados estruturais, evitando inconsistências na média aritmética de azimutes opostos, como 0° e 180°, cujo valor médio correto deve refletir o eixo N-S, e não 90° (E-W) (Caixeta, 2020). A interpolação foi realizada considerando a decomposição

dos ângulos em vetores cartesianos, permitindo a aplicação de métodos como IDW, com manutenção da correlação entre os componentes vetoriais.

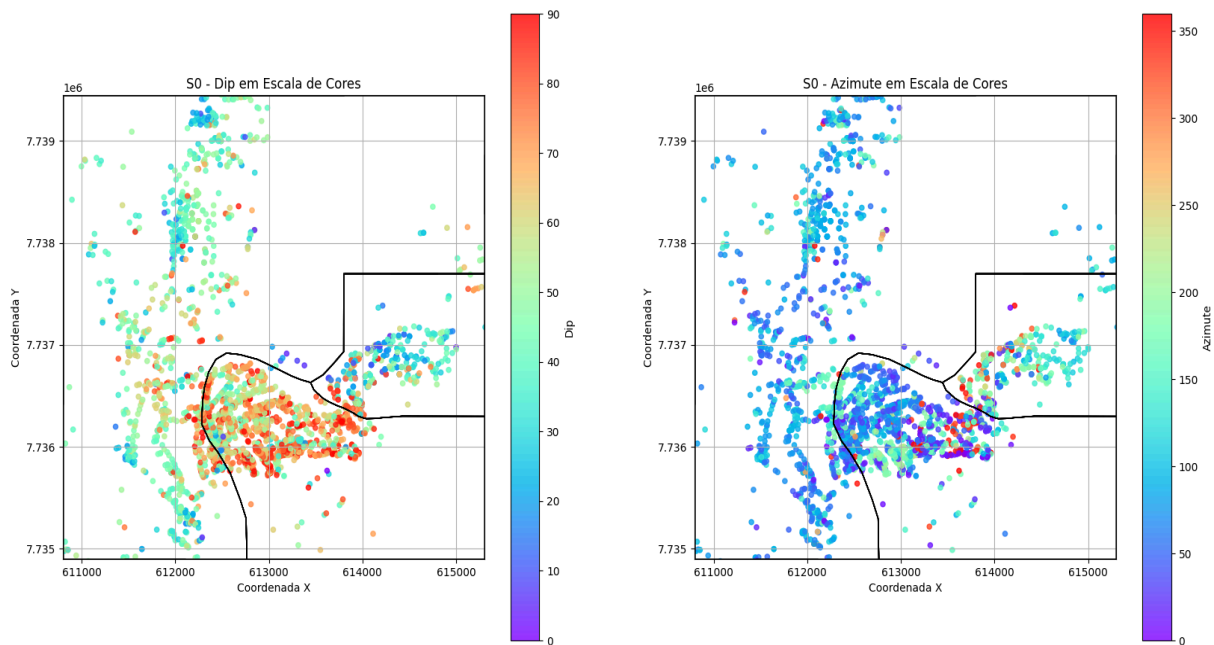


Figura 20: Mapas de dispersão das amostras de S0, evidenciando a distribuição de *dip* (esquerda) e *azimute* (direita) em uma área georreferenciada. A escala de cores indica a variação dos valores, com tons frios para valores baixos e tons quentes para valores altos. A linha preta delimita os setores da região de estudo.

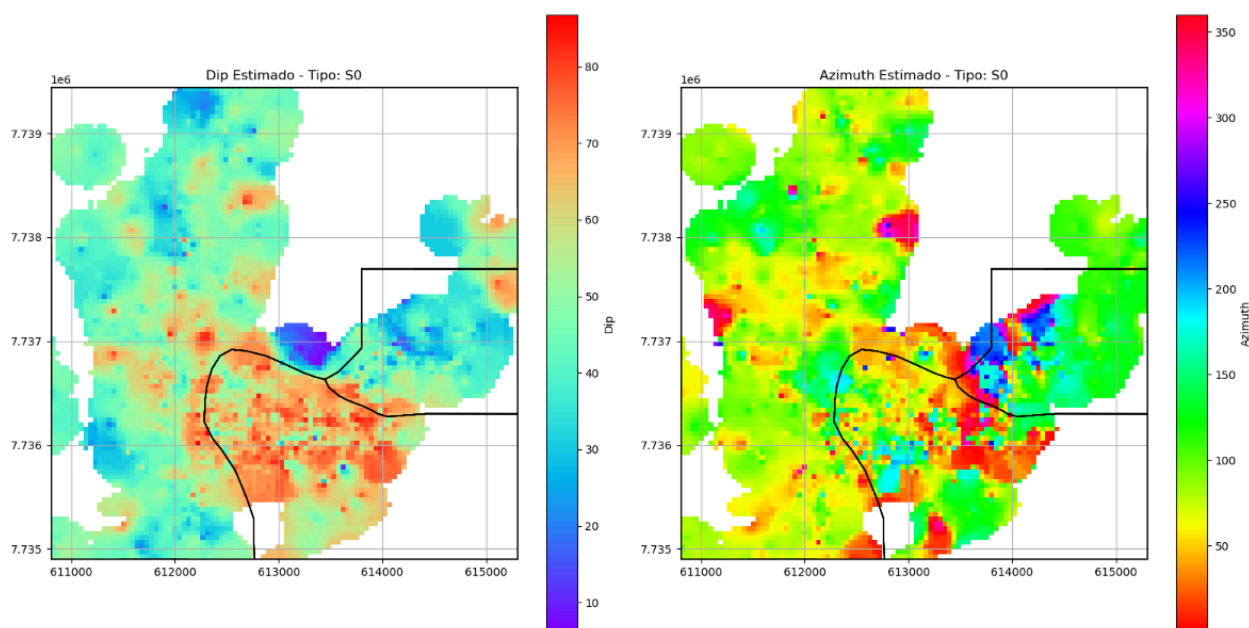


Figura 21: Mapa de interpolação dos dados estruturais de dip (mergulho) e azimute para S0.

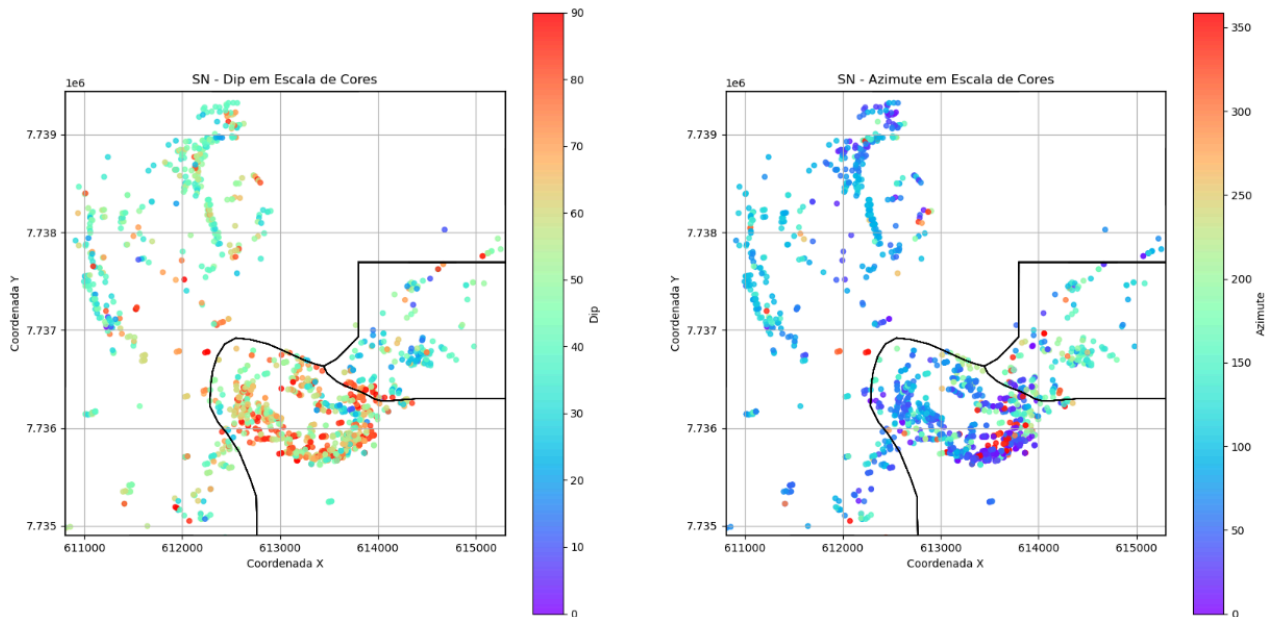


Figura 22: Mapas de dispersão das amostras de SN, evidenciando a distribuição de *dip* (esquerda) e *azimute* (direita) em uma área georreferenciada. A escala de cores indica a variação dos valores, com tons frios para valores baixos e tons quentes para valores altos. A linha preta delimita os setores da região de estudo.

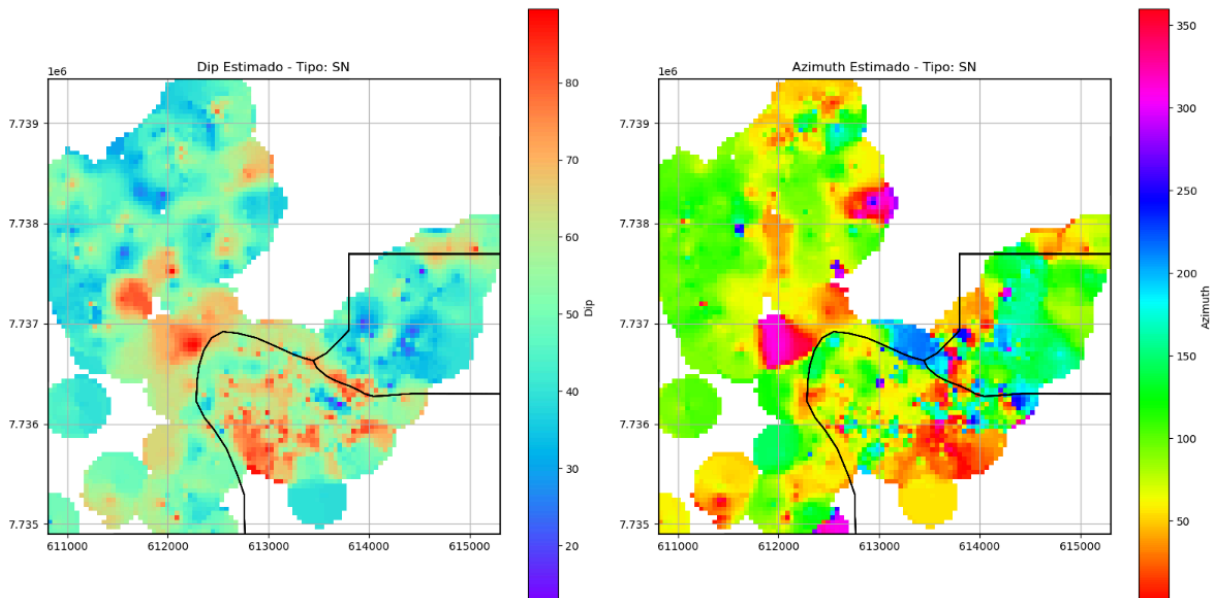


Figura 23: Mapa de interpolação dos dados estruturais de dip (mergulho) e azimute para SN

Essas análises permitem uma compreensão detalhada da distribuição espacial das estruturas, facilitando a interpretação das condições tectônicas e deposicionais que controlam a orientação das camadas em cada setor do depósito.

7.3.1 Clustering por K-Means

Uma análise aprofundada dos dados estruturais foi realizada utilizando a técnica de agrupamento K-Means como método de tratamento e interpretação. Para isso, os dados de dip e azimute, coletados em campo com bússolas geológicas, foram transformados do sistema polar para o sistema cartesiano. Essa transformação é fundamental, pois permite que os dados sejam representados de maneira vetorial, preservando com precisão as informações de direção e inclinação.

Os dados angulares, quando trabalhados diretamente em graus, podem levar a interpretações imprecisas devido à circularidade dos ângulos. Por exemplo, os valores próximos a 0° e 360° representam a mesma direção, mas, em uma análise matemática simples, poderiam ser tratados como extremos opostos, resultando em distorções médias e perda de coerência. A transformação para o sistema cartesiano resolve essa limitação ao converter os ângulos em componentes vetoriais X, Y e Z, permitindo que operações como médias, distâncias e agrupamentos sejam realizadas de forma consistente e alinhada com a realidade física das direções estruturais.

Além disso, a abordagem vetorial facilita a aplicação de técnicas de aprendizado de máquina e métodos estatísticos, como o K-Means, que dependem da proximidade entre os dados no espaço cartesiano para formar agrupamentos coerentes. Dessa forma, a transformação não apenas minimiza inconsistências matemáticas, mas também garante uma análise mais robusta e representativa dos dados estruturais, possibilitando a identificação de padrões e tendências que refletem com fidelidade os processos geológicos atuantes.

Essa etapa é essencial para assegurar que os resultados obtidos sejam geologicamente interpretáveis e livre de artefatos numéricos, contribuindo para uma modelagem estrutural mais precisa e confiável.

Com os valores transformados, foi possível interpolá-los pelo método, garantindo a consistência estatística das correlações. Para isso, aplicaram-se

ensaios de agrupamento com três e cinco clusters. O valor de 3 é proveniente do que está sendo adotado atualmente, o valor de 5 é extraído de análises estatísticas, usando as técnicas mostrada na imagem abaixo:

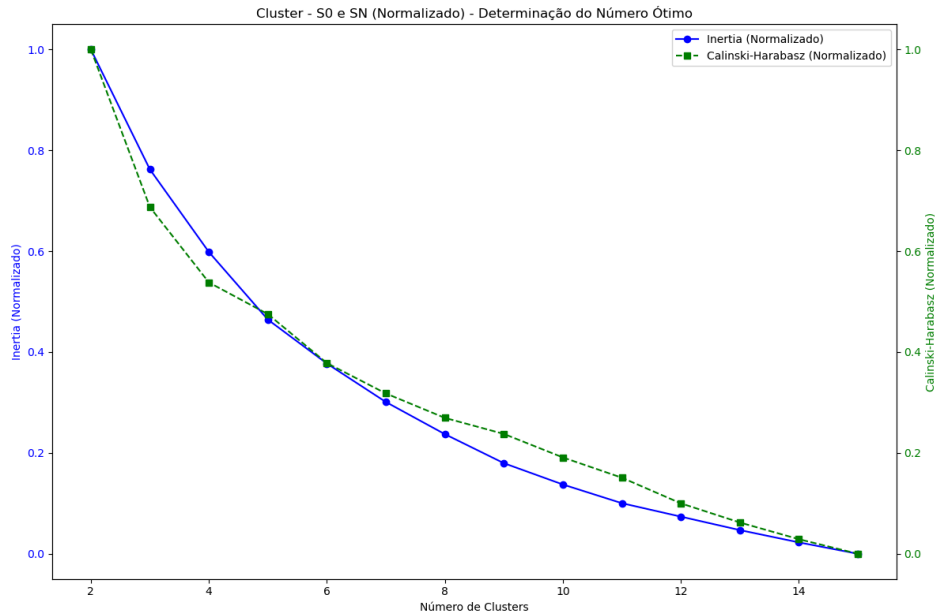


Figura 24: Gráfico de determinação do número ideal de clusters utilizando os critérios de Inércia e Calinski-Harabasz normalizados.

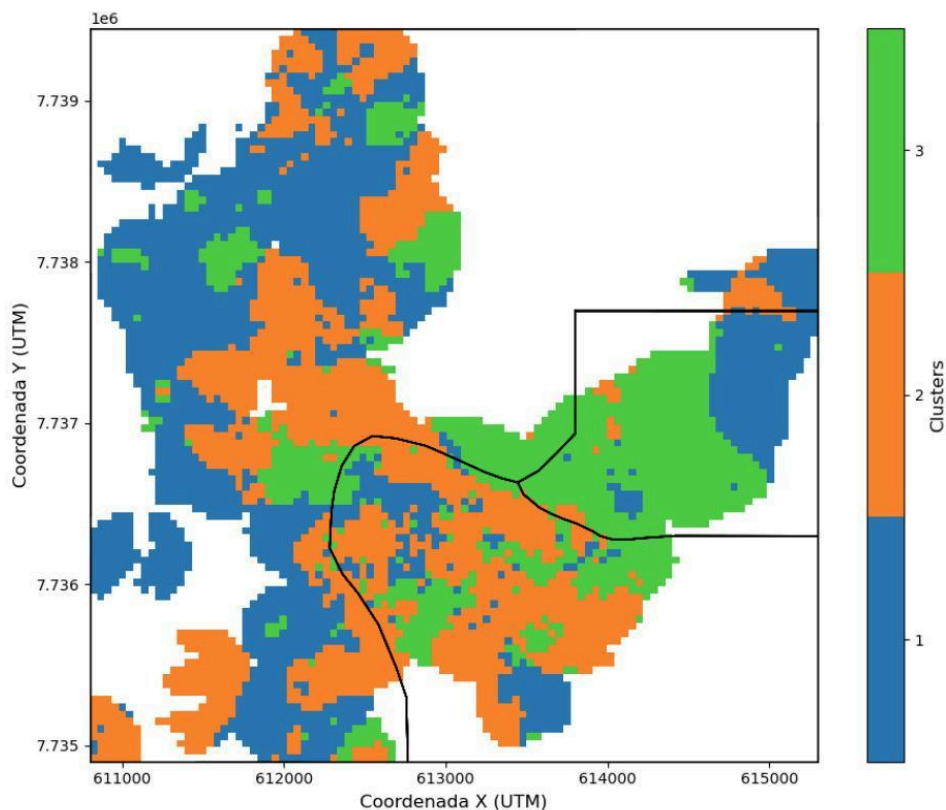
A imagem apresenta um gráfico para determinar o número ideal de clusters em uma análise de clusterização, utilizando os métodos de Inércia e do Índice Calinski-Harabasz. A inércia, representada pela linha azul, mede a soma das distâncias quadráticas entre os pontos e os centroides dos clusters. À medida que o número de clusters aumenta, a inércia diminui, mas os ganhos se tornam cada vez menos significativos. O ponto de inflexão da curva, conhecido como "cotovelo" (*elbow*), indica o número ideal de clusters, pois após esse ponto a redução da inércia se torna marginal. Neste caso, o cotovelo parece estar entre 4 e 6 clusters.

O Índice Calinski-Harabasz, representado pela linha verde, avalia a qualidade da clusterização ao comparar a dispersão entre os clusters com a dispersão dentro dos clusters. Valores mais altos desse índice sugerem clusters bem definidos, ou seja, com boa separação e compactação. Observa-se que o índice apresenta seus valores mais altos para números menores de clusters e começa a diminuir conforme

o número de clusters aumenta, sugerindo que valores próximos de 4 clusters são ideais.

Em resumo, ao combinar os resultados dos dois métodos, conclui-se que o número ideal de clusters está em torno de 4 a 6, com uma ênfase maior no valor 4, pois ele representa o equilíbrio entre simplicidade do modelo e qualidade da clusterização.

Estes testes permitiram identificar direções preferenciais de continuidade e geraram mapas estruturais interpretativos mais detalhados. A análise multivariada, com suporte de métodos matemáticos, revelou que o setor ENG mantém valores de azimute mais elevados e pronunciados em comparação aos demais setores. Os resultados obtidos corroboram as interpretações anteriores e demonstram que a ampliação do número de clusters contribui para uma compreensão mais refinada das características estruturais da área em estudo.



Cluster	Dip Total (°)	Azimuth Total (°)
1.0	47.99	92.6
2.0	58.0	54.92
3.0	51.61	140.18

Figura 25: Mapa de clusters para dip e azimute com pontos de dados originais, destacando a distribuição espacial dos 3 clusters em diferentes cores conforme a legenda lateral e os pontos pretos indicam a localização dos dados originais.

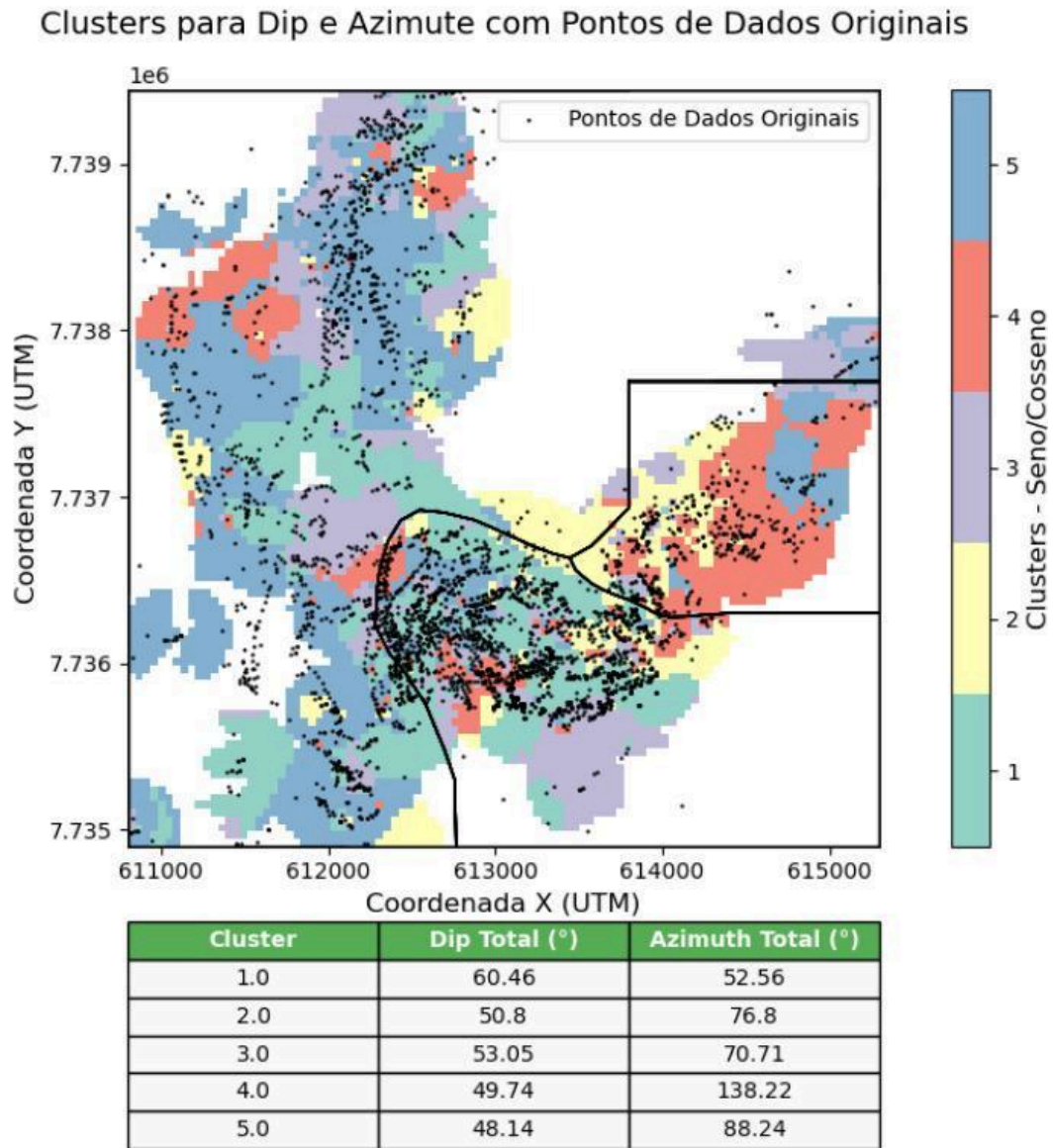


Figura 26: Mapa de clusters para dip e azimute com pontos de dados originais, destacando a distribuição espacial dos 5 clusters em diferentes cores conforme a legenda lateral e os pontos pretos indicam a localização dos dados originais.

Os dados superficiais podem ter sido significativamente afetados por processos de intemperismo e alterações ao longo do tempo, o que implica que eles

não necessariamente refletem as condições da subsuperfície de forma precisa. No entanto, mesmo com essas limitações, os dados ainda fornecem informações valiosas que permitem uma compreensão preliminar do comportamento estrutural da região. Ao analisar os clusters, nota-se que não há uma homogeneidade clara em sua disposição espacial, o que sugere uma complexidade estrutural natural. Apesar dessa falta de homogeneidade, as duas análises realizadas apresentaram uma consistência importante: o setor ENG demonstra um comportamento estrutural distinto em relação aos demais. Isso reforça a ideia de que há uma diferenciação relevante nesse setor, possivelmente relacionada a características geológicas específicas. Por outro lado, os setores CP e CN, embora apresentem pequenas diferenças entre si, não exibem uma variação suficientemente expressiva que justifique sua compartimentação em dois domínios estacionários distintos para fins de estimativa. Essa observação sugere que o comportamento estrutural de CP e CN é relativamente semelhante, o que permite tratá-los de forma conjunta em uma abordagem geoestatística, sem perda significativa de precisão ou representatividade.

Uma análise complementar foi realizada com PCA (Figura 27). Na técnica de PCA, os dados foram agrupados em cinco clusters distintos utilizando o algoritmo de agrupamento K-means (Figura 26). Cada cluster está representado por uma cor diferente no gráfico, e a barra de legenda à direita indica os rótulos numéricos dos clusters (1 a 5). O eixo X representa a primeira componente principal (CP1), enquanto o eixo Y corresponde à segunda componente principal (CP2). Essas componentes são combinações lineares das variáveis originais que maximizam a variância explicada.

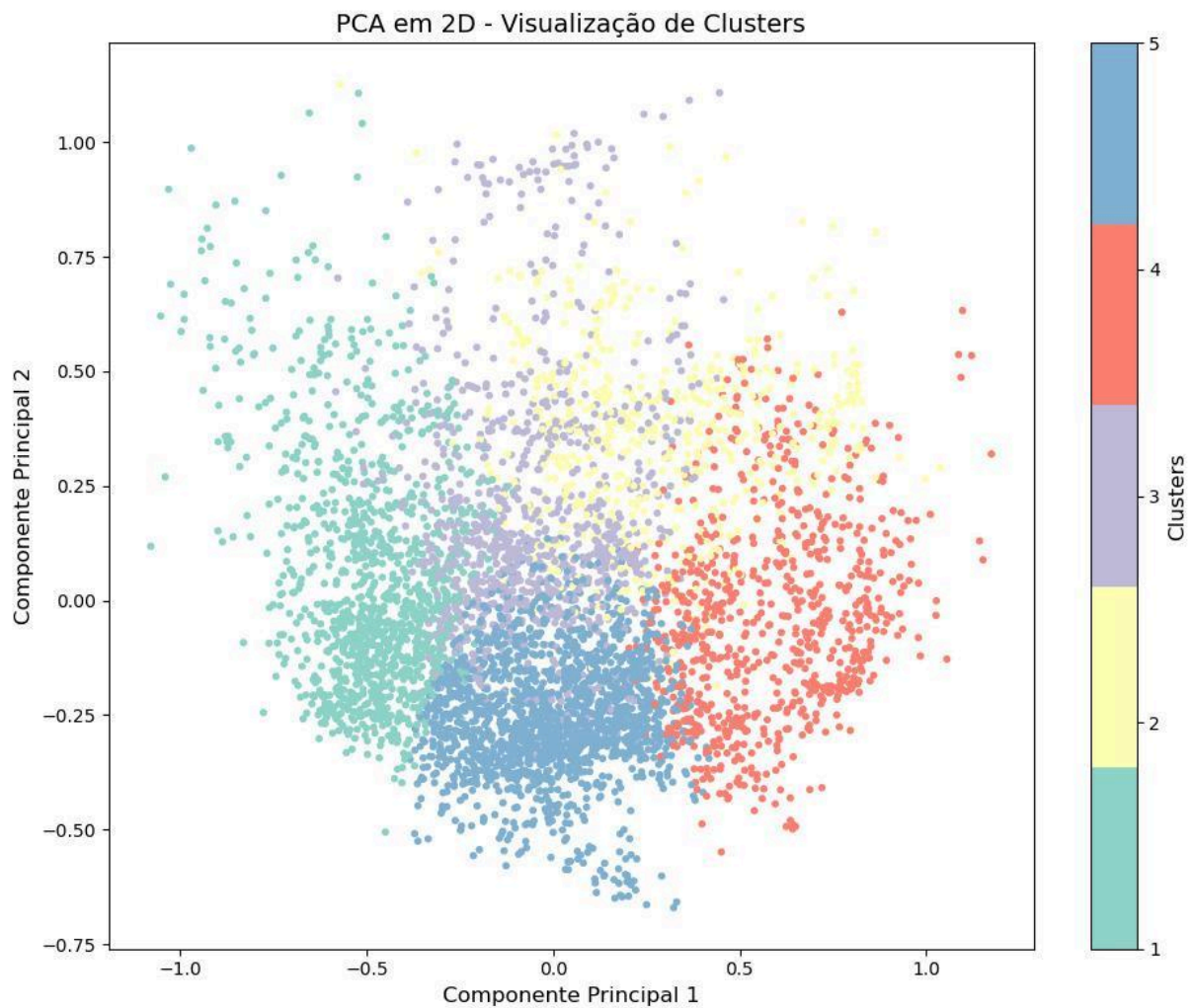


Figura 27: Distribuição de 5 clusters em 2D. As cores indicam os grupos identificados na redução de dimensionalidade.

O espaço reduzido proporcionado pela PCA permite uma visualização mais clara e intuitiva dos agrupamentos, sendo uma etapa fundamental na análise exploratória de dados em aplicações como aprendizado de máquina e reconhecimento de padrões. A redução de dimensionalidade facilita uma interpretação mais fiel das relações entre os dados, destacando suas principais variabilidades e estruturas.

Na visualização, observa-se que, embora os clusters apresentem uma definição geral, há áreas de sobreposição entre alguns grupos, como, por exemplo, entre o clusters 1,2 e 5 (verde, amarelo, azul) e o cluster 3 (lilás). Essa sobreposição pode indicar a presença de elementos com características semelhantes ou

transições graduais entre os grupos, sugerindo que a diferenciação entre eles pode não ser suficientemente marcada.

Por outro lado, o cluster 4 (vermelho), embora apresente certa dispersão interna em sua distribuição, exibe uma delimitação bem definida em relação aos demais grupos. Essa separação clara indica uma diferenciação significativa no contexto geral dos dados, reforçando a existência de características estruturais distintas associadas a este grupo específico. Essa observação é particularmente relevante, pois sugere que, mesmo com variações internas, o cluster vermelho apresenta consistência suficiente para ser tratado como uma entidade separada dos demais clusters.

8. DISCUSSÃO

Este estudo empregou métodos que têm se tornado cada vez mais comuns e indispensáveis no campo das geociências. Foi realizada uma análise detalhada dos dados disponíveis, considerando informações previamente estabelecidas e domínios modelados anteriormente. A rotina implementada e descrita nos capítulos precedentes teve como objetivo principal comparar os resultados gerados pelos algoritmos com os dados originais, permitindo assim sugerir e inferir novos modelos e análises para a área de estudo. Essa abordagem buscou aprimorar o modelo atual, considerando que o contexto pode frequentemente variar entre modelos baseados em litotipos, geoquímicos ou outras abordagens específicas. O trabalho fez uso de ferramentas geoestatísticas e técnicas de análise multivariada para auxiliar na modelagem de domínios estacionários, garantindo maior consistência às interpretações geocientíficas.

A análise realizada revelou a complexidade inerente à compartimentação geoestatística do depósito mineral da Formação Cauê, situado no Quadrilátero Ferrífero. Os resultados obtidos indicam que a atual compartimentação estrutural da mina, dividida em três setores, demonstra que não há necessidade de compartimentação do Corpo Oeste e Corpo Principal. A utilização de variogramas, análise exploratória de dados (EDA) e a aplicação de técnicas de análise multivariada, como agrupamento por K-Means e análise de componentes principais (ACP), demonstraram que não há uma variação significativa entre esses dois domínios.

Os resultados da análise indicaram que os domínios estruturais, atualmente definidos com base em critérios internos da empresa, apresentam variações substanciais quando analisados do ponto de vista geoquímico e estrutural. As diferenças encontradas na continuidade espacial das variáveis estudadas sugerem que a compartimentação atual pode não estar levando em consideração a complexidade dos processos de formação, como anisotropias e remobilização secundárias dos minerais. O comportamento dos variogramas, que apresentou padrões semelhantes entre CP e CN e distinto para ENG, quando analisados, é um forte indicativo da necessidade de revisão da compartimentação atual.

Além disso, a análise de continuidade espacial revelou que as anisotropias observadas estão possivelmente associadas às feições estruturais e à distribuição dos minerais, influenciadas por eventos geológicos complexos que estabeleceram padrões específicos. A investigação das causas responsáveis por esse efeito ainda está em estudo, evidenciando sua relevância, especialmente devido ao impacto direto nos processos de estimativa geoestatística. A incorporação de anisotropias nos modelos resultou em uma maior aderência entre o modelo geoestatístico e a realidade observada no depósito. A redefinição dos domínios estacionários, a partir de uma análise integrada entre geoquímica e estrutural, permite uma representação mais próxima dos fenômenos naturais, melhorando a acurácia das estimativas de recursos e, conseqüentemente, otimizando os processos de exploração mineral.

Portanto, a discussão sobre a necessidade de uma reavaliação dos domínios geoestatísticos destaca a importância de integrar diferentes fontes de dados — tanto estruturais quanto geoquímicos — para obter uma modelagem mais fidedigna. Isso garante que as estimativas de recursos sejam mais representativas, reduzindo incertezas e proporcionando uma base sólida para a tomada de decisões no planejamento da exploração e gestão dos recursos disponíveis.

9. CONCLUSÃO

A análise variográfica é uma etapa essencial na compreensão de análise de continuidade espacial e na modelagem de domínios estacionários, permitindo a identificação de zonas de isotropia ou anisotropia. O confronto entre diferentes modelos matemáticos, como os derivados de algoritmos de agrupamento ou métodos geoestatísticos e o modelo geológico original, é uma abordagem relevante para avaliar a consistência e a correspondência entre cenários. Sendo assim, essa comparação permite não apenas verificar qual abordagem está mais alinhada com a realidade dos dados, mas também explorar as limitações do modelo proposto.

Dadas as características dos variogramas do Corpo Norte e do Corpo Principal analisados, ainda que apresentem diferenças entre si, estas não se mostram suficientemente significativas para justificar a subdivisão em múltiplos domínios estruturais na estimativa dos teores de ferro ou em análises de domínios estacionários. As diferenças observadas nas continuidades espaciais e nas direções predominantes, como o mergulho estrutural, mostram-se suficientemente semelhantes para que possam ser modeladas dentro de um único domínio estrutural, sem comprometer a qualidade das estimativas geoestatísticas. Variogramas semelhantes, em termos de continuidade espacial, alcance e anisotropia, indicam que os domínios compartilham de características espaciais, reduzindo a necessidade de separação.

Já referente ao setor Engenho, este apresentou valores de continuidade espacial, a partir da análise variográfica, distintos do CP e CN, em que os índices de minério de ferro estão distribuídos estruturalmente de forma distinta, refletindo características geológicas que influenciam diretamente na distribuição do minério, indicando a necessidade de uma abordagem segmentada no processo de análise e estimativa. Vale ressaltar que a complexidade geológica da área é significativa, e a alteração superficial dificulta a correlação direta com as condições de subsuperfície. Ainda assim, padrões recorrentes podem ser identificados, mesmo que a estrutura não seja homogênea, há evidências de uma organização estrutural. Microleituras realizadas na superfície, apesar de afetadas pelos processos de alteração, podem

contribuir com resultados que reflitam características consistentes com as expectativas.

O setor do Engenho demonstrou evidências geológicas distintas, muito provavelmente devido tanto aos eventos geológicos quanto à presença de uma intrusão de um metagabro que contribuiu para a formação de um padrão geológico único exigindo uma abordagem diferenciada na modelagem e análise geoestatística da área. A interação entre a intrusão e os fluidos gerou uma compartimentação espacial significativa, refletindo a necessidade de um tratamento específico para o setor Engenho, para que as estimativas de teor de ferro sejam realizadas de maneira mais precisa e compatível com as particularidades geológicas locais.

Assim, recomenda-se que a modelagem variográfica e o processo de estimativa seja personalizado para este setor, respeitando sua compartimentação espacial evidenciando a existência de uma compartimentação espacial significativa.

10. REFERÊNCIAS

Alabert, F. (1987). *Stochastic Imaging of Spatial Distributions Using Hard and Soft Information*. Thesis - Stanford University, Stanford, California, 1987. 197p.

Almeida, F.F.M. 1977. O Cráton de São Francisco. - Rev. Bras. Geociências, 7 (4): 349 - 364.

Almeida, T. (2011). *A Perfilagem geofísica gama-gama em depósitos de ferro do Quadrilátero Ferrífero – Uma ferramenta para medições de densidade de rochas*. Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 181p.

Alkmim, F.F.; Marshak, S. *Transamazonian orogeny in the Southern Sao Francisco craton region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero*. Precambrian Research, v. 90, n. 1-2, p. 29-58, 1998

Amorim, L.Q. & Alkmim F.F. (2011). *New ore types from the Cauê banded iron formation, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil - Responses to the growing demand*. Iron ore conference. Perth, WA, 1-14.

Armstrong, M. (1999). *Basic Linear Geostatistics*. Berlin: Springer, 153p

Atkinson, P.M.; Lloyd, C.D. (2007) *Non-stationary variogram models for geostatistical sampling optimization: An empirical investigation using elevation data*. Computers & geosciences, v. 33, n. 10, p. 1285–1300.

Azevedo, U.R. Machado, M.M.M (2013). Patrimônio geológico e minério do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais - Caracterização e iniciativas de uso para Educação e Geoturismo. Boletim Paranaense de Geociências. Dezembro 2013. 18f.

Babinski, M.; Chemale JR., F.; Van Schmus, W. R. *The Pb/Pb age of the Minas Supergroup carbonate rocks, Quadrilátero Ferrífero, Brazil.* Precambrian Research, v. 72, p. 235-245, 1995.

Batista, F.F (2012). *Influência de Modelos de Dependência Espacial na Definição de Mapas Temáticos.* Dissertação de mestrado, Programa de Pós Graduação em Estatística Aplicada e Biometria, Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 59f.

Beck, K.C. *Sediment-water interactions of some Georgia rivers and estuaries.* Relatório final de projeto – Georgia Institute of Technology, Georgia, 1972. 97 p.

Biondi, J.C. (2015). *Processos Metalogenéticos e os Depósitos Minerais Brasileiros.* 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos. Biondi, J. C

Coimbra J.L.M et al. (2007). *Técnicas multivariadas aplicadas ao estudo da fauna do solo: contrastes multivariados e análise canônica discriminante.* Revista Ceres 54: 270-276.

Dymek, R.F. Klein, C. (1988). Chemistry, petrology and origin of iron formations lithologies from 3800 Ma Isua supracrustal belt, west Greenland.

Dorr, J.V.N. (1959) Esboço Geológico do Quadrilátero Ferrífero de MG. In: DNPM-USGS. Publicação Especial 1.

Klein, C. (2005). *Some Precambrian banded iron-formations (BIFs) from around the world: their age, geologic setting, mineralogy, metamorphism, geochemistry and origin.* American Mineralogist, v. 90, n. 10, p. 1473-1499.

Lague, J.P. (2023). *Agrupamentos Alinhados na Modelagem de Recursos Minerais.* Porto Alegre, 91p.. Monografia de Conclusão de Curso, Curso de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre

Longo, I. (2023). *Análise da Incerteza na Modelagem Geológica em Depósitos Minerai s de Ferro*. Porto Alegre, 61p. Monografia de Conclusão de Curso, Curso de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre

Machado, N., Noce, C. M., Ladeira, E.A. & Belo O.A. (1992) *U-Pb Geochronology of Archean magmatism and Proterozoic metamorphism in the Quadrilátero Ferrífero, southern São Francisco Craton, Brazil*. Geological Society of America Bulletin, 104: 1221- 1227.

Matheron, G. (1963) Principles of geostatistics. Economic Geology, Society of Economic Geologists, v. 58, n. 8, p. 1246–1266.

McLennan, J.A. (2007) *The decision of stationarity*. Tese de Doutorado — University of Alberta.

Mineração em números: principais substâncias produzidas – participação no faturamento do setor. 2024. Disponível em: <https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2024/07/Mineracao-em-Numeros-1S24.pdf>. Acesso em: 3 out. 2024.

Moreira, G.C. (2020) Análise de agrupamento aplicada à definição de domínios de estimativa para a modelagem de recursos minerais. 2020. 101 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.

Neto, M.M.J. Estatística multivariada. *Revista de Filosofia e Ensino*, 9 maio 2004. Disponível em: http://www.criticanarede.com/cien_estatistica.html. Acesso em: 10 set. 2024.

Panorama Mineração Do Brasil. Brazil mining overview. 2024. Disponível em: <https://publicbrasil.com.br/pdf/PanoramaMineracao/PMB2024.pdf>. Acesso em: 8 nov. 2024.

Poveromo, J.J. (1999). Ironmaking Volume Pittsburgh: The Association of Iron and Steel Engineers, Steel Foundation, 547–550.

Processos Metalogenéticos e os Depósitos Minerais Brasileiros. 2. ed. rev. e atual. São Paulo: Oficina de Textos

Renger, F.E.; Noce, C. M.; Romano, A.W.; Machado, N. (1994). Evolução sedimentar do Supergrupo Minas: 500 Ma de registro geológico no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. *Geonomos*, v. 2, n. 1, p. 1-12,.

Ribeiro, E.Q. (2011). *Caracterização Tecnológica do Itabirito Pobre Compacto – “IPC” da Mina Casa de Pedra, MG.* Belo Horizonte, 78p. Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte

Rossi, M.E.; Deutsch, C.V. (2014). *Mineral resource estimation.* Dordrecht: Springer. 332 p. Disponível em: <http://extras.springer.com>. Acesso em: 17 out. 2024.

Rosière C.A. Chemale F Jr, Guimarães M.LV. (1993) *Um modelo para a evolução microestrutural dos minérios de ferro do Quadrilátero Ferrífero.* Parte I - estruturas e recristalização. *Geonomos.*;1(1):65-84.

Trendall, A.F. (2002). The significance of iron-formation in the Precambrian stratigraphic record. *Precambrian sedimentary environments: A modern approach to ancient depositional systems*, p. 33-66.

U.S. Geological Survey. Mineral commodity summaries (2024). Reston: U.S. Geological Survey, 2024. 212 p. Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2024/mcs2024.pdf>. Acesso em: 6 nov. 2024.

Vicini, L. (2005). *Análise multivariada: da teoria à prática.* 215 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

Wang, Y. (2009). *Generation of banded iron formations by internal dynamics and leaching of oceanic crust*. Nature geoscience. Vol.2