

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

BRUNO SCAF BORGES

**AVALIAÇÃO DO IMPACTO DA UTILIZAÇÃO DE DIFERENTES BASES DE DADOS DE
DENSIDADE NA ESTIMATIVA DA MASSA EM INVENTÁRIOS DE RECURSOS
MINERAIS**

Caçapava do Sul

2024

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

BRUNO SCAF BORGES

**AVALIAÇÃO DO IMPACTO DA UTILIZAÇÃO DE DIFERENTES BASES DE DADOS DE
DENSIDADE NA ESTIMATIVA DA MASSA EM INVENTÁRIOS DE RECURSOS
MINERAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Geologia da Universidade Federal
do Pampa, como requisito parcial para
obtenção do Título de Bacharel em Geologia.

Orientador: Prof. Dr. Luis Eduardo de Souza

Coorientador: Me. Adriano Gomes Morais de
Oliveira

Caçapava do Sul

2024

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

B898a Borges, Bruno Scaf

Avaliação do impacto da utilização de diferentes bases de dados de densidade na estimativa da massa em inventários de recursos minerais / Bruno Scaf Borges.

233 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade Federal do Pampa, GEOLOGIA, 2024.

"Orientação: Luis Eduardo de Souza".

1. Geologia. 2. Geoestatística. 3. Engenharia de minas. 4. Densidade. 5. Recursos minerais. I. Título.

Borges

Avaliação do impacto da utilização de diferentes bases de dados de densidade na estimativa da massa em inventários de recursos minerais

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Geologia da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Geologia.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em 11 de dezembro de 2024.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Luis Eduardo de Souza

Orientador

Universidade Federal do Pampa

Profa. Dra. Luciana Arnt Abichequer

Universidade Federal do Pampa

Prof. Msc. Luiz Delfino Teixeira Albarnaz

Universidade Federal do Pampa



Assinado eletronicamente por **LUIZ DELFINO TEIXEIRA ALBARNAZ, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 11/12/2024, às 15:44, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **LUCIANA ARNT ABICHEQUER, PROFESSOR**

DO MAGISTERIO

SUPERIOR, em 11/12/2024, às 16:55, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as

normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **LUIS EDUARDO DE SOUZA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 11/12/2024, às 17:35, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1617192** e o código CRC **9510CC7E**.

https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador.php?acao=procedimento_trabalhar&acao_origem=protocolo_pesquisa_rapida&id_protocolo=1764495... 1/2
11/12/2024, 17:49 SEI/UNIPAMPA - 1617192 - SISBI/Folha de Aprovação

Universidade Federal do Pampa,

Campus Caçapava do Sul

https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador.php?acao=procedimento_trabalhar&acao_origem=protocolo_pesquisa_rapida&id_protocolo=1764495... 2/2

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente ao professor Dr. Luis Eduardo de Souza por todos os ensinamentos durante a graduação e orientação durante este trabalho, que tornou possível a realização do mesmo. Ao geólogo, mestre e amigo Adriano Gomes Morais de Oliveira por toda paciência e ensinamentos transmitidos durante a sua coorientação.

À Instituição Universidade Federal do Pampa e todos os seus funcionários, desde os professores tão qualificados, aos técnicos extremamente competentes e aos servidores dedicados que em conjunto exercem um excelente papel, promovendo o ensino público de extrema qualidade em um ambiente extremamente confortável e aconchegante aos estudantes.

A todos os meus familiares, que me apoiaram de maneira incondicional durante estes anos, nunca deixando faltar amor, carinho, cuidado e incentivos, vocês fizeram falta longe, mas certamente fizeram a diferença para eu chegar até aqui.

Aos meus amigos que sempre acreditaram em mim e me apoiaram, especialmente aqueles que eu ganhei durante o período de graduação, que acabaram por se tornar minha segunda família, me ensinando muito e tornando os eventuais empecilhos dessa jornada bem mais fáceis de serem enfrentados.

Um agradecimento especial ao meu amigo Leo Murta Leite Alves, que me ajudou a ultrapassar um obstáculo com seus conhecimentos de programação e ciência de dados, você não sabe como foi importante para a conclusão deste trabalho, você foi capaz de me ajudar a encontrar uma solução quando eu estava travado achando que não teria uma saída.

Por fim, mas não menos importante, gostaria de agradecer a todos aqueles que acreditam, investem e propagam a ciência e o conhecimento, com a fé de que esse é de fato o caminho para construirmos um mundo melhor.

RESUMO

A densidade é uma variável muito importante na avaliação de um recurso mineral e na produção de um inventário mineral. Grande parte dessa importância está atrelada ao fato desta variável compor o cálculo da tonelagem de um depósito mineral. Entretanto, de maneira geral, sua estimativa ao longo de todo o depósito não é feita de maneira adequada, isto porque ainda é comum a utilização de uma densidade média para cada litologia que compõe o depósito e, desta forma, não é considerada a variabilidade espacial da densidade. Neste sentido, o seguinte trabalho busca comparar diferentes bases de dados de densidade, para então compor as estimativas da densidade de um depósito e, assim, poder calcular a tonelagem, verificando o impacto da utilização destas diferentes bases de informação. Para realizar esta comparação foram produzidas três estimativas de densidade por técnicas de krigagem ordinária, sendo uma utilizando a densidade obtida através de ensaios diretos de laboratório, outra utilizando valores de densidade calculados a partir do Cálculo Normativo Mineralógico e a terceira utilizando valores de densidade obtidos a partir da perfilagem geofísica gama-gama. A partir destas estimativas, foi feita uma seleção dos blocos cujo valor de densidade continha informações para os três métodos simultaneamente, depois foram calculadas as massas para cada um dos métodos e os valores de densidade e massa foram comparados, utilizando o método da perfilagem geofísica gama-gama como referência. Foram realizadas estimativas para cada um dos métodos para três litotipos, Itabirito Friável, Itabirito Compacto e Itabirito Friável Rico. O banco de dados se refere a um depósito de ferro da região do Quadrilátero Ferrífero, no estado de Minas Gerais.

Palavras-chave: Densidade, Cálculo Normativo Mineralógico, Perfilagem Geofísica Gama-Gama, Estimativa, Minério de Ferro.

ABSTRACT

When evaluating a mineral resource and building a mineral inventory, density is a key factor, because it is used to calculate the deposit tonnage. However, in the estimation process, density itself is not being used properly, because the companies are commonly using an average density value for each lithology of such deposit, instead of considering its regional variability. To diminish such mistakes, this study focuses on a comparison between different ways to obtain density value, so that more accurate estimations can be produced. To support such comparison, three estimations will be produced using ordinary kriging for each lithology, each for a different density acquisition method, one using the direct laboratory methods, one using the gamma-gamma logging geophysical method and the other using the calculated density obtained from the normative mineralogy. To compare those values, it was necessary a selection of blocks which had density estimated simultaneously for the three methods, and the tonnage was calculated for each of the density methods, so that density and mass could be compared, considering the gamma-gamma geophysical logging method as reference. The estimations were produced for three different lithotypes, the compact itabirite, the friable itabirite and the rich friable itabirite. The database is from an iron deposit from the Minas Gerais state, at the region known as Quadrilátero Ferrífero.

Keywords: Density, Mineralogical Norms Calculation, Gamma-Gamma Geophysical Logging, Estimation, Iron Ore.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Fluxograma da metodologia do trabalho.....	31
Tabela 1 - Sumário da abordagem da variável densidade em 50 relatórios técnicos SEDAR (System for Electronic Document Analysis and Retrieval).....	34
Figura 2 - Gráfico que mostra como 50 empresas reportaram a variável densidade no inventário mineral de operações.....	35
Figura 3 - Ilustração da técnica do deslocamento de água por duas abordagens: a) medindo apenas a cesta que contém as rochas; b) medindo todo compartimento, a água contida, a cesta e as amostras.....	38
Figura 5 - Método do gabarito retangular para obtenção de densidade.....	39
Figura 6 - Método da substituição de areia para obtenção de densidade de rochas.....	40
Tabela 2 - CNM utilizando proporções de pesos moleculares (% P.M.) dos elementos/óxidos para rochas de minério de ferro desenvolvido por Motta (2014) adaptado a partir de Voicu et al. (1997) e Ribeiro (2003).....	42
Figura 7 - Ilustração do método de desagrupamento de amostras através das células móveis.....	50
Figura 8 - Gráfico de variograma exemplificando os elementos (i), (ii) e (iii).....	54
Figura 9 - Exemplo de lag, tolerância de lag, tolerância angular e bandwidth.....	55
Figura 10 - Tipos de funções matemáticas mais comuns que se utilizam para ajustar a curva do variograma.....	56
Figura 11 - Elipsoide de anisotropia (d) definido a partir dos variogramas direcionais experimentais (a,b e c).....	57
Figura 12 - Representação de um modelo de blocos.....	61
Figura 13 - Ilustração esquemática de como realizar a validação cruzada. A flecha está apontando para a amostra que será removida para ter seu valor estimado na figura a). Removendo-a sobram as outras amostras encontradas em b). Esta amostra que foi removida tem seu valor representado em c). A figura d) é responsável por mostrar a figura contendo todas as amostras e o valor real e estimado.....	63
Figura 14 - Mapa de localização das 4017 amostras presentes no banco de dados.....	65
Figura 15 - Mapa de localização das 1653 amostras cujo valor de densidade foi obtido através do CNM.....	66
Figura 16 - Mapa de localização das 2930 amostras cujo valor da densidade foi obtido através da perfilagem geofísica gama-gama.....	66
Figura 17 - Mapa de localização das 2404 amostras cujo valor da densidade foi obtido através dos ensaios diretos.....	67
Tabela 3 - Sumário estatístico da variável densidade para os diferentes métodos de obtenção para a litologia IC.....	67
Figura 18 - Histograma da variável densidade para a litologia IC para o método de obtenção da densidade através do CNM.....	68
Figura 19 - Histograma da variável densidade para a litologia IC para o método de obtenção da densidade através da perfilagem geofísica gama-gama.....	69
Figura 20 - Histograma da variável densidade para a litologia IC para o método de obtenção da densidade através dos ensaios diretos.....	70

Tabela 4 - Sumário estatístico da variável densidade para os diferentes métodos de obtenção para a litologia IF.....	71
Figura 21 - Histograma da variável densidade para a litologia IF para o método de obtenção da densidade através do CNM.....	72
Figura 22 - Histograma da variável densidade para a litologia IF para o método de obtenção da densidade através da perfilação geofísica gama-gama.....	73
Figura 23 - Histograma da variável densidade para a litologia IF para o método de obtenção da densidade através dos ensaios diretos de laboratório.....	74
Tabela 5 - Sumário estatístico da variável densidade para os diferentes métodos de obtenção para a litologia IC.....	75
Figura 24 - Histograma da variável densidade para a litologia IFR para o método de obtenção da densidade através do CNM.....	76
Figura 25 - Histograma da variável densidade para a litologia IFR para o método de obtenção da densidade através da perfilação geofísica gama-gama.....	77
Figura 26 - Histograma da variável densidade para a litologia IFR para o método de obtenção da densidade através dos ensaios diretos de laboratório.....	78
Figura 27: Mapa de localização da região do Quadrilátero Ferrífero - MG.....	80
Figura 28 - Mapa Geológico do Quadrilátero Ferrífero - MG.....	82
Tabela 6 - Parâmetros utilizados nos testes de desagrupamento de amostras pelo método das células móveis.....	84
Figura 29 - Resultado do desagrupamento pelo método das células móveis para a litologia IC e método CNM.....	85
Figura 30 - Resultado do desagrupamento pelo método das células móveis para a litologia IC e método gama-gama.....	86
Figura 31 - Resultado do desagrupamento pelo método das células móveis para a litologia IC e método dos ensaios diretos.....	87
Figura 32 - Resultado do desagrupamento pelo método das células móveis para a litologia IF e método CNM.....	88
Figura 33 - Resultado do desagrupamento pelo método das células móveis para a litologia IF e método gama-gama.....	89
Figura 34 - Resultado do desagrupamento pelo método das células móveis para a litologia IF e método dos ensaios diretos.....	90
Figura 35 - Resultado do desagrupamento pelo método das células móveis para a litologia IFR e método CNM.....	91
Figura 36 - Resultado do desagrupamento pelo método das células móveis para a litologia IFR e método gama-gama.....	92
Figura 37 - Resultado do desagrupamento pelo método das células móveis para a litologia IFR e método dos ensaios diretos.....	93
Tabela 7 - Variograma omnidirecional para a litologia IC e método CNM.....	94
Figura 38 - Variograma omnidirecional modelado.....	95
Tabela 8 - Variograma multidirecional para a litologia IC e método CNM.....	96
Figura 39 - Variograma multidirecional modelado.....	97

Tabela 9 - Variograma omnidirecional para a litologia IC e método gama-gama.....	98
Figura 40 - Variograma omnidirecional modelado.....	99
Tabela 10 - Variograma multidirecional para a litologia IC e método gama-gama.....	100
Figura 41 - Variograma multidirecional modelado.....	101
Tabela 11 - Variograma omnidirecional para a litologia IC e método ensaios diretos de laboratório.....	102
Figura 42 - Variograma omnidirecional modelado.....	103
Tabela 12 - Variograma multidirecional para a litologia IC e método dos ensaios diretos de laboratório.....	104
Figura 43 - Variograma multidirecional modelado.....	105
Tabela 13 - Variograma omnidirecional para a litologia IF e método CNM.....	106
Figura 44 - Variograma omnidirecional modelado.....	107
Tabela 14 - Variograma multidirecional para a litologia IF e método CNM.....	108
Figura 45 - Variograma multidirecional modelado.....	109
Tabela 15 - Variograma omnidirecional para a litologia IF e método gama-gama.....	110
Figura 46 - Variograma omnidirecional modelado.....	111
Tabela 16 - Variograma multidirecional para a litologia IF e método gama-gama.....	112
Figura 47 - Variograma multidirecional modelado.....	113
Tabela 17 - Variograma omnidirecional para a litologia IF e método dos ensaios diretos.....	114
Figura 48 - Variograma omnidirecional modelado.....	115
Tabela 18 - Variograma multidirecional para a litologia IF e método gama-gama.....	116
Figura 49 - Variograma multidirecional modelado.....	117
Tabela 19 - Variograma omnidirecional para a litologia IFR e método do CNM.....	118
Figura 50 - Variograma omnidirecional modelado.....	119
Tabela 20 - Variograma multidirecional para a litologia IFR e método CNM.....	120
Figura 51 - Variograma multidirecional modelado.....	121
Tabela 21 - Variograma omnidirecional para a litologia IFR e método da perfilagem geofisica gama-gama.....	122
Figura 52 - Variograma omnidirecional modelado.....	123
Tabela 22 - Variograma multidirecional para a litologia IFR e método da perfilagem geofisica gama-gama.....	124
Figura 53 - Variograma multidirecional modelado.....	125
Tabela 23- Variograma omnidirecional para a litologia IFR e método dos ensaios diretos de laboratório.....	126
Figura 54 - Variograma omnidirecional modelado.....	127
Tabela 24 - Variograma multidirecional para a litologia IFR e método dos ensaios diretos de laboratório.....	128
Figura 55 - Variograma multidirecional modelado.....	129
Tabela 25 - Parâmetros adotados para a estimativa de densidade da litologia IC e método CNM.....	131

Tabela 26 - Sumário estatístico da densidade estimada a partir da krigagem ordinária para a litologia IC e método CNM.....	131
Figura 56 - Estimativa de densidade para a litologia IC e método CNM vista em planta.....	131
Figura 57 - Estimativa de densidade para a litologia IC e método CNM vista em perfil.....	132
Tabela 27 - Parâmetros adotados para a estimativa de densidade da litologia IC e método da perfilagem geofísica gama-gama.....	132
Tabela 28 - Sumário estatístico da densidade estimada a partir da krigagem ordinária para a litologia IC e método perfilagem geofísica gama-gama.....	132
Figura 58 - Estimativa de densidade para a litologia IC e método da perfilagem geofísica gama-gama vista em planta.....	133
Figura 59 - Estimativa de densidade para a litologia IC e método da perfilagem geofísica gama-gama vista em perfil.....	133
Tabela 29 - Parâmetros adotados para a estimativa de densidade da litologia IC e método dos ensaios diretos de laboratório.....	134
Tabela 30 - Sumário estatístico da densidade estimada a partir da krigagem ordinária para a litologia IC e método dos ensaios diretos de laboratório.....	134
Figura 60 - Estimativa de densidade para a litologia IC e método dos ensaios diretos de laboratório vista em planta.....	134
Figura 61 - Estimativa de densidade para a litologia IC e método dos ensaios diretos de laboratório vista em perfil.....	135
Tabela 31 - Parâmetros adotados para a estimativa de densidade da litologia IF e método CNM.....	135
Tabela 32 - Sumário estatístico da densidade estimada a partir da krigagem ordinária para a litologia IF e método do CNM.....	135
Figura 62 - Estimativa de densidade para a litologia IF e método CNM vista em planta.....	136
Tabela 33 - Parâmetros adotados para a estimativa de densidade da litologia IF e método da perfilagem geofísica gama-gama.....	137
Tabela 34 - Sumário estatístico da densidade estimada a partir da krigagem ordinária para a litologia IF e método da perfilagem geofísica gama-gama.....	137
Figura 64 - Estimativa de densidade para a litologia IF e método da perfilagem geofísica gama-gama vista em planta.....	138
Figura 65 - Estimativa de densidade para a litologia IF e método da perfilagem geofísica gama-gama vista em perfil.....	138
Tabela 35 - Parâmetros adotados para a estimativa de densidade da litologia IF e método dos ensaios diretos de laboratório.....	139
Tabela 36 - Sumário estatístico da densidade estimada a partir da krigagem ordinária para a litologia IF e método dos ensaios diretos de laboratório.....	139
Figura 66 - Estimativa de densidade para a litologia IF e método dos ensaios diretos de laboratório vista em planta.....	139
Figura 67 - Estimativa de densidade para a litologia IF e método dos ensaios diretos de laboratório vista em perfil.....	140
Tabela 37 - Parâmetros adotados para a estimativa de densidade da litologia IFR e método	

CNM.....	140
Tabela 38 - Sumário estatístico da densidade estimada a partir da krigagem ordinária para a litologia IFR e método CNM.....	140
Figura 68 - Estimativa de densidade para a litologia IFR e método CNM vista em planta....	141
Figura 69 - Estimativa de densidade para a litologia IFR e método CNM vista em perfil.....	141
Tabela 39 - Parâmetros adotados para a estimativa de densidade da litologia IFR e método da perfilação geofísica gama-gama.....	142
Tabela 40 - Sumário estatístico da densidade estimada a partir da krigagem ordinária para a litologia IFR e método da perfilação geofísica gama-gama.....	142
Figura 70 - Estimativa de densidade para a litologia IFR e método da perfilação geofísica gama-gama vista em planta.....	142
Figura 71 - Estimativa de densidade para a litologia IFR e método da perfilação geofísica gama-gama vista em perfil.....	143
Tabela 41 - Parâmetros adotados para a estimativa de densidade da litologia IFR e método dos ensaios diretos de laboratório.....	143
Tabela 42 - Sumário estatístico da densidade estimada a partir da krigagem ordinária para a litologia IFR e método dos ensaios diretos de laboratório.....	143
Figura 72 - Estimativa de densidade para a litologia IFR e método dos ensaios diretos de laboratório vista em planta.....	144
Figura 73 - Estimativa de densidade para a litologia IFR e método dos ensaios diretos de laboratório vista em perfil.....	144
Figura 74 - Histograma do erro padrão da estimativa referente à litologia IC e método CNM... 146	
Figura 75 - Scatterplot entre valor observado e valor estimado referente à litologia IC e método CNM.....	147
Figura 76 - Valor estimado versus erro padrão referente à litologia IC e método CNM.....	148
Figura 77 - Histograma do erro padrão da estimativa referente à litologia IC e método da perfilação geofísica gama-gama.....	149
Figura 78 - Scatterplot entre valor observado e valor estimado referente à litologia IC e método da perfilação geofísica gama-gama.....	150
Figura 79 - Valor estimado versus erro padrão referente à litologia IC e método CNM.....	151
Figura 80 - Histograma do erro padrão da estimativa referente à litologia IC e método dos ensaios diretos de laboratório.....	152
Figura 81 - Scatterplot entre valor observado e valor estimado referente à litologia IC e método dos ensaios diretos de laboratório.....	153
Figura 82 - Valor estimado versus erro padrão referente à litologia IC e método dos ensaios diretos de laboratório.....	154
Figura 83 - Histograma do erro padrão da estimativa referente à litologia IF e método CNM... 155	
Figura 84 - Scatterplot entre valor observado e valor estimado referente à litologia IF e método CNM.....	156
Figura 85 - Valor estimado versus erro padrão referente à litologia IF e método CNM.....	157

Figura 86 - Histograma do erro padrão da estimativa referente à litologia IF e método da perfilagem geofísica gama-gama.....	158
Figura 87 - Scatterplot entre valor observado e valor estimado referente à litologia IF e método da perfilagem geofísica gama-gama.....	159
Figura 88 - Valor estimado versus erro padrão referente à litologia IF e método CNM.....	160
Figura 89 - Histograma do erro padrão da estimativa referente à litologia IF e método dos ensaios diretos de laboratório.....	161
Figura 90 - Scatterplot entre valor observado e valor estimado referente à litologia IF e método dos ensaios diretos de laboratório.....	162
Figura 91 - Valor estimado versus erro padrão referente à litologia IF e método dos ensaios diretos de laboratório.....	163
Figura 92 - Histograma do erro padrão da estimativa referente à litologia IFR e método CNM.	164
Figura 93 - Scatterplot entre valor observado e valor estimado referente à litologia IFR e método CNM.....	165
Figura 94 - Valor estimado versus erro padrão referente à litologia IFR e método CNM.....	166
Figura 95 - Histograma do erro padrão da estimativa referente à litologia IFR e método da perfilagem geofísica gama-gama.....	167
Figura 96 - Scatterplot entre valor observado e valor estimado referente à litologia IFR e método da perfilagem geofísica gama-gama.....	168
Figura 97 - Valor estimado versus erro padrão referente à litologia IFR e método da perfilagem geofísica gama-gama.....	169
Figura 98 - Histograma do erro padrão da estimativa referente à litologia IFR e método dos ensaios diretos de laboratório.....	170
Figura 99 - Scatterplot entre valor observado e valor estimado referente à litologia IFR e método dos ensaios diretos de laboratório.....	171
Figura 100 - Valor estimado versus erro padrão referente à litologia IFR e método dos ensaios diretos de laboratório.....	172
Tabela 43 - Comparação entre os sumários estatísticos dos valores observados e valores estimados para a litologia IC.....	174
Tabela 44 - Tabela contendo o sumário estatístico apenas dos blocos selecionados.....	175
Tabela 45 - Cálculo da massa em toneladas a partir do volume e da densidade média.....	176
Figura 101 - Blocos selecionados para a litologia IC e método CNM visto em planta.....	177
Figura 102 - Blocos selecionados para a litologia IC e método CNM visto em perfil.....	178
Figura 103 - Blocos selecionados para a litologia IC e método do gama-gama visto em planta.	179
Figura 104 - Blocos selecionados para a litologia IC e método do gama-gama visto em perfil..	180
Figura 105 - Blocos selecionados para a litologia IC e método dos ensaios diretos de laboratório visto em planta.....	181
Figura 106 - Blocos selecionados para a litologia IC e método dos ensaios diretos de laboratório visto em perfil.....	182

Figura 107 - Scatterplot da densidade estimada dos blocos selecionados do método da perfilagem geofísica gama-gama versus CNM.....	183
Figura 108 - Scatterplot da massa calculada dos blocos selecionados do método da perfilagem geofísica gama-gama versus CNM.....	184
Figura 109 - Scatterplot da densidade estimada dos blocos selecionados do método da perfilagem geofísica gama-gama versus ensaios diretos de laboratório.....	185
Figura 110 - Scatterplot da massa calculada dos blocos selecionados do método da perfilagem geofísica gama-gama versus ensaios diretos de laboratório.....	186
Figura 111 - Scatterplot do coeficiente de rank da densidade estimada dos blocos selecionados do método da perfilagem geofísica gama-gama versus ensaios diretos de laboratório.....	187
Figura 112 - Scatterplot do coeficiente de rank da densidade dos blocos selecionados do método da perfilagem geofísica gama-gama versus ensaios diretos de laboratório.....	188
Tabela 46 - Matriz de correlação da densidade dos blocos selecionados utilizando a perfilagem geofísica gama-gama como base.....	189
Tabela 47 - Matriz de correlação de rank da densidade dos blocos selecionados utilizando a perfilagem geofísica gama-gama como base.....	189
Tabela 48 - Comparação entre os sumários estatísticos dos valores observados e valores estimados para a litologia IF.....	191
Tabela 49 - Tabela contendo o sumário estatístico apenas dos blocos selecionados.....	192
Tabela 50 - Cálculo da massa em toneladas a partir do volume e da densidade média.....	192
Figura 113 - Blocos selecionados para a litologia IF e método CNM visto em planta.....	193
Figura 114 - Blocos selecionados para a litologia IF e método CNM visto em perfil.....	193
Figura 115 - Blocos selecionados para a litologia IF e método do gama-gama visto em planta..	194
Figura 116 - Blocos selecionados para a litologia IF e método do gama-gama visto em perfil...	194
Figura 117 - Blocos selecionados para a litologia IF e método dos ensaios diretos de laboratório visto em planta.....	195
Figura 118 - Blocos selecionados para a litologia IF e método dos ensaios diretos de laboratório visto em perfil.....	195
Figura 119 - Scatterplot da densidade estimada dos blocos selecionados do método da perfilagem geofísica gama-gama versus CNM.....	196
Figura 120 - Scatterplot da massa calculada dos blocos selecionados do método da perfilagem geofísica gama-gama versus CNM.....	197
Figura 121 - Scatterplot da densidade estimada dos blocos selecionados do método da perfilagem geofísica gama-gama versus ensaios diretos de laboratório.....	198
Figura 122 - Scatterplot da massa calculada dos blocos selecionados do método da perfilagem geofísica gama-gama versus ensaios diretos de laboratório.....	199
Figura 123 - Scatterplot do coeficiente de rank da densidade estimada dos blocos selecionados do método da perfilagem geofísica gama-gama versus CNM.....	200
Figura 124 - Scatterplot do coeficiente de rank da densidade estimada dos blocos selecionados do método da perfilagem geofísica gama-gama versus ensaios diretos de laboratório.....	201
Tabela 50 - Matriz de correlação da densidade dos blocos selecionados utilizando a	

perfilagem geofísica gama-gama como base.....	202
Tabela 51 - Matriz de correlação da densidade dos blocos selecionados utilizando a perfilagem geofísica gama-gama como base e utilizando o coeficiente de correlação de rank.....	202
Tabela 52 - Comparação entre os sumários estatísticos dos valores observados e valores estimados para a litologia IFR.....	204
Tabela 53 - Tabela contendo o sumário estatístico apenas dos blocos selecionados.....	205
Tabela 54 - Cálculo da massa em toneladas a partir do volume e da densidade média.....	205
Figura 125 - Blocos selecionados para a litologia IFR e método CNM visto em planta.....	206
Figura 126 - Blocos selecionados para a litologia IFR e método CNM visto em perfil.....	206
Figura 127 - Blocos selecionados para a litologia IFR e método do gama-gama visto em planta.....	207
Figura 128 - Blocos selecionados para a litologia IFR e método do gama-gama visto em perfil.....	207
Figura 129 - Blocos selecionados para a litologia IFR e método dos ensaios diretos de laboratório visto em planta.....	208
Figura 130 - Blocos selecionados para a litologia IFR e método dos ensaios diretos de laboratório visto em perfil.....	208
Figura 131 - Scatterplot da densidade estimada dos blocos selecionados do método da perfilagem geofísica gama-gama versus CNM.....	209
Figura 132 - Scatterplot da massa calculada dos blocos selecionados do método da perfilagem geofísica gama-gama versus CNM.....	210
Figura 133 - Scatterplot da densidade estimada dos blocos selecionados do método da perfilagem geofísica gama-gama versus ensaios diretos de laboratório.....	211
Figura 134 - Scatterplot da massa calculada dos blocos selecionados do método da perfilagem geofísica gama-gama versus ensaios diretos de laboratório.....	212
Figura 135 - Scatterplot da densidade estimada dos blocos selecionados do método da perfilagem geofísica gama-gama versus CNM e utilizando coeficiente de correlação de rank.....	213
Figura 136 - Scatterplot da densidade estimada dos blocos selecionados do método da perfilagem geofísica gama-gama versus ensaios diretos de laboratório e considerando coeficiente de correlação de rank.....	214
Tabela 55 - Matriz de correlação da densidade dos blocos selecionados utilizando a perfilagem geofísica gama-gama como base.....	215
Tabela 56 - Matriz de correlação da densidade dos blocos selecionados utilizando a perfilagem geofísica gama-gama como base para o coeficiente de rank.....	215

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CNM - Cálculo Normativo Mineralógico

EDA - *Exploratory Data Analysis* (Análise Exploratória dos Dados)

IC - Itabirito Compacto

GG - Gama-gama

IF - Itabirito Friável

IFR - Itabirito Friável Rico

MG - Minas Gerais

MRE - *Mineral Resource Estimate*

PEA - *Preliminary Economic Assessment*

PFS - *Pre-Feasibility Study*

QF - Quadrilátero Ferrífero

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	19
1.1 Justificativa	21
1.2 Estado da Arte	22
1.3 Meta	28
1.4 Objetivos específicos	28
1.5 Metodologia	29
1.6 Organização do trabalho	32
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	33
2.1 Densidade	33
2.1.1 Métodos diretos de obtenção de densidade	37
2.1.2 Cálculo normativo mineralógico (CNM)	40
2.1.3 Perfilagem geofísica gama-gama	43
2.2 Estimativa por técnicas geoestatísticas	45
2.2.1 Análise exploratória dos dados (EDA)	45
2.2.1.1 Estatística univariada	46
2.2.1.2 Estatística bivariada	47
2.2.1.3 Desagrupamento de amostras	49
2.2.2 Análise espacial dos dados	50
2.2.2.1 Variogramas	52
2.2.2.2 Krigagem ordinária	57
2.2.2.3 Modelo de blocos	59
2.2.3 Validação Cruzada	61
3. ESTUDO DE CASO	64
3.1 Banco de dados	64
3.1.1 Itabirito Compacto - IC	67
3.1.2 Itabirito Friável - IF	70
3.1.3 Itabirito Friável Rico - IFR	74
3.2 Contexto geológico do Quadrilátero Ferrífero	79
4. DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO	84
4.1 Desagrupamento de amostras	84
4.2 Análise estrutural dos dados - Variografia	93
4.3 Estimativas de densidade por krigagem ordinária	130
4.4 Validação cruzada	145
5. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	173
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	217
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	223
8. ANEXOS	227

1. INTRODUÇÃO

A indústria mineral tem como uma de suas principais características os altos custos envolvidos durante o seu desenvolvimento, desde as etapas investigativas até a produção, operação e fechamento da mina. Desta forma, para o melhor planejamento e execução de um projeto mineral, o ideal seria obter o maior número de informações possíveis acerca de um depósito durante a fase de prospecção mineral (fase inicial às operações). Entretanto, devido a este custo elevado, o número de amostras que compõem a estimativa da massa de um depósito é limitado. Dentre as diferentes técnicas de amostragem, uma que é amplamente empregada é a sondagem com recuperação de testemunho, que apesar do custo e do tempo necessários para amostragem (chegando a custar centenas de dólares e demorar semanas para uma amostra) é um método tido como confiável. Além do mais com o material recuperado é possível realizar ensaios laboratoriais que possibilitam investigar propriedades físicas e químicas das rochas presentes no depósito.

Uma maneira de aumentar o conhecimento acerca das propriedades físico-químicas de um determinado depósito é através da aplicação de métodos geofísicos, que apesar de serem métodos indiretos, são capazes de fornecer informações valiosas e precisas, com um alto grau de confiabilidade acerca das propriedades físicas das rochas. Assim, a perfilagem geofísica gama-gama acaba sendo um complemento para a sondagem com recuperação de testemunho, com a vantagem de que a perfilagem geofísica pode ser realizada em um furo de sondagem existente, não havendo a necessidade de recuperação de material.

Todas as informações que são descobertas acerca de um depósito são valiosas e ajudam tanto a compreender as características do depósito, quanto a compor as estimativas que serão realizadas sobre os atributos de interesse. Estas estimativas por sua vez irão compor o inventário mineral, que pode ser definido como um documento que contém diversas informações acerca de um depósito, dentre elas a quantidade disponível de um ou mais bens minerais contidos no mesmo e cuja quantificação é produto de estimativas empíricas ou teóricas. Além do mais, este inventário mineral é elaborado desde o início da exploração mineral e é constantemente revisado e atualizado com a mina já em atividade, a cada vez que novas informações são incorporadas ao conjunto de dados.

Neste processo de sumarizar os recursos via inventário mineral, é importante salientar que os números apresentados acerca dos recursos minerais e reservas de minério devem estar associados com um grau de confiabilidade, representado justamente pela categorização dos

recursos em medido, indicado e inferido, e das reservas em provadas e prováveis. Um recurso seria qualquer mineral de interesse que estivesse disponível para ser extraído, porém a reserva diz respeito a um mineral de interesse cuja extração possibilite um retorno financeiro, isto é, um lucro.

Estas estimativas que envolvem os recursos minerais evoluíram nos últimos 40 anos e são fundamentais para o desenvolvimento do trabalho dos geólogos e engenheiros de minas. Tais estimativas para recursos e reservas se baseiam na construção de modelos que podem ser de pequeno, médio e longo prazo. Estes modelos são matemáticos e envolvem procedimentos sistemáticos que seguem os seguintes passos: coleta e processamento dos dados, interpretação e modelagem geológica, atribuição dos teores e cálculo das incertezas.

As estimativas são utilizadas para calcular informações do depósito como: teor, massa, volume, espessura de uma camada ou corpo, densidade, etc. A densidade configura uma propriedade importante, pois é a partir dela que se calcula a massa do depósito, pelo produto entre a densidade e o volume conhecidos.

Apesar da densidade configurar uma propriedade importante nas estimativas que envolvem os depósitos minerais, a mesma não vem sendo utilizada da maneira mais apropriada. Isto porque as empresas têm preferencialmente focado esforços na modelagem e na estimativa dos teores de seus *commodities* principais e contaminantes, deixando a densidade em segundo plano. Na maior parte dos casos, o valor de densidade utilizado é um valor médio por litotipo, calculado a partir de uma quantidade restrita de ensaios diretos, que acabam desconsiderando questões importantes como porosidade, permeabilidade, umidade ou grau de alteração da rocha, além de acabar desconsiderando a variabilidade que a densidade possui ao longo de todo o depósito mineral.

A importância de se considerar a densidade variável em um depósito é: a massa total do minério e o conteúdo metálico do depósito são calculados em função do volume do corpo e da densidade do mesmo. Sendo assim, uma densidade média acarretaria uma avaliação menos precisa e confiável das massas, podendo levar a superestimativas ou subestimativas.

Para realizar estimativas é construído um modelo de blocos e, para que as estimativas sejam as melhores possíveis, o mais apropriado seria que cada bloco produzido se aproximasse o máximo possível da realidade. Desta forma, se ao invés de distribuir a densidade conforme a sua variação real no depósito, for calculada uma média para cada litotipo presente no depósito, e depois disso, em cada bloco for considerado este valor médio

de acordo com a litologia, o modelo de blocos não estará de acordo com a situação real. O impacto nas estimativas pode ser tamanho, que pode tanto inviabilizar uma extração viável ou, ainda, considerar uma massa de minério maior que a existente e, assim, acarretar prejuízos às empresas. A densidade impacta, portanto, na tonelagem de um depósito, que por sua vez está ligado à vida útil da mina e ao lucro que irá se obter com a extração.

Tendo em vista este conhecimento acerca da importância da densidade para compor estimativas e do impacto que diferentes bases de dados de densidade podem vir a acarretar no planejamento de uma mina, o seguinte trabalho tem como objetivo comparar o impacto nas estimativas para um depósito mineral de ferro do Quadrilátero Ferrífero (QF) no estado de Minas Gerais, a partir de três bases de dados de densidade diferentes: a densidade média por litologia a partir de ensaios diretos, a densidade obtida através do cálculo normativo mineralógico (CNM) e a densidade obtida através da perfilação geofísica do tipo gama-gama.

Para avaliar este impacto, serão realizadas estimativas para a variável densidade a partir de três métodos diferentes de se obter a mesma e, ao final do processo de estimativa, será feita uma comparação entre as estimativas geradas, utilizando o método da perfilação geofísica gama-gama como referência. Para realizar as estimativas será utilizado um modelo de blocos de dimensões 10m x 10m x 10m. Após as estimativas terem sido realizadas e validadas, serão selecionados os blocos em comum para os diferentes métodos e estes terão sua massa calculada, bem como uma massa calculada levando em consideração o valor de densidade publicado no relatório da mina para cada litologia. Com as massas calculadas, os resultados serão comparados para poder verificar qual o impacto de se utilizar diferentes densidades no processo de estimativas de recursos minerais.

1.1 Justificativa

A relevância deste trabalho tem como base o fato de o minério de ferro ser a *commodity* que mais agrega valor no PIB nacional. Além disso, nos inventários minerais de grandes empresas, sejam no Brasil ou no mundo, muitas vezes o valor da densidade a ser utilizado para a estimativa da tonelagem é baseado em uma densidade média de cada tipologia. Sendo assim, é necessário que as estimativas de tonelagem de um depósito sejam realizadas a partir de bases de dados que levem em conta a regionalização da densidade em um depósito, ao invés de estimativas oriundas de uma densidade média simples. O efeito

desta incorporação torna os resultados mais precisos, acurados e ricos em detalhes, aumentando assim a confiabilidade da informação fornecida em um inventário mineral.

Outro fator decisivo é que empresas multinacionais no Brasil e no mundo já utilizam o método de perfilagem gama-gama nas etapas de prospecção e pesquisa mineral, pois o mesmo é vantajoso, de fácil aplicabilidade e com um custo não tão elevado, quando em comparação com outros procedimentos envolvidos na mineração. A perfilagem gama-gama já é muito aplicada para a prospecção de óleo e gás e sua aparição na mineração é mais recente, porém estas empresas ainda não se utilizam dos dados de densidade obtidos para produzir os modelos, desta forma, a informação já existente não está sendo devidamente aproveitada.

1.2 Estado da Arte

Como foi discutido anteriormente, os recursos minerais são expressos em massas para cada litologia de minério. Porém, as estimativas produzidas para o teor de um depósito têm um olhar mais atencioso, ao passo que as estimativas de densidade são deixadas em segundo plano (ARSENEAU, 2013; MAKHUVHA *et al.*, 2014; LISBOA, 2018; LOMBERG, 2021). Isto acarreta na atribuição de um valor médio de densidade por litologia, para cada litologia que constitui o depósito que, talvez até possa ser adequada em alguns depósitos (como por exemplo camadas tabulares de carvão, onde a variação da densidade é baixa ao longo do depósito), entretanto, para depósitos compostos de diferentes litologias, ou que sofram fenômenos como a zonação mineral, maior ou menor diluição, a densidade pode ser consideravelmente mais variável dentro do mesmo depósito (SINCLAIR & BLACKWELL, 2004).

Desta forma, considerar uma densidade média para depósitos irá acarretar, de maneira geral, em possíveis erros graves na estimativa da tonelagem e superestimativa ou subestimativa do conteúdo metálico do corpo (SINCLAIR & BLACKWELL, 2004). Para poder construir um modelo fiel que represente esta variação da densidade é necessário compreender como a densidade varia com o teor e com a geologia do depósito (LISBOA, 2018; LOMBERG, 2021). Logo, é de suma importância que o banco de dados tenha informações confiáveis de densidade.

Um levantamento realizado por Arseneau (2013) aponta que a densidade não era utilizada de maneira apropriada com base em 50 sumários de empresas de mineração. Destes 50 sumários 29 são de metais preciosos, 10 são de metais base, 7 são de depósitos do tipo

pórfiro e 4 são depósitos de metais raros. Constatou-se que 58% das densidades apresentadas eram por média simples, 20% estimadas a partir das densidades obtidas, 18% sequer eram discutidas e apenas 4% eram densidades ponderadas (sendo estimadas com ferramentas geoestatísticas), isto é, levavam em conta o fenômeno regionalizado de sua distribuição, ressaltando-se a necessidade de considerar-se a regionalização da variável em questão, assim como é feito com os teores de um depósito mineral. Entre os depósitos em que a densidade era calculada, o método mais utilizado foi o deslocamento de volume. É importante salientar que todos os documentos indicavam a existência de mais de um domínio geológico, entretanto a maioria utilizou o mesmo valor de densidade para todos os domínios, ao invés de utilizar um valor referente a cada domínio geológico.

Desta forma, podemos assumir que para depósitos cujo conteúdo metálico é baixo e a mineralogia é simples, um valor médio de densidade já é o suficiente para produzir uma estimativa confiável. Porém, deve ser levado em consideração os diferentes domínios geológicos, e cada um destes ter a sua densidade calculada para compor a estimativa final. Já para os depósitos cuja mineralogia é mais complexa existe uma relação entre densidade e teor, de tal maneira que a utilização de uma densidade média para cada domínio geológico produz erros locais nas estimativas e estes por sua vez acarretam em erros na tonelagem do depósito (SINCLAIR & BLACKWELL, 2004). Para contornar este problema e produzir uma estimativa mais confiável e menos passível de erros, sugere-se que o depósito tenha sua densidade estimada da mesma maneira e com o mesmo cuidado que aquela utilizada para o teor do depósito (MAKHUVHA *et al.*, 2014).

Em Lisboa (2018) é realizada uma precisa descrição dos impactos da densidade na estimativa das tonelagens de um corpo, quando a mesma é apenas uma média simples ou variável ao longo do depósito, para uma mina de ferro no depósito de Brucutu, no QF. Além disso, aborda os diferentes tipos de densidade no ramo da indústria mineral: densidade específica, densidade relativa e densidade aparente; e específica o que a porosidade, a composição mineralógica, o conteúdo de água nos poros, as diferentes litologias e os aspectos estruturais (fraturas ou falhas) afetam no que diz respeito à densidade do depósito, tanto localmente, quanto regionalmente. Para tal, a autora se utiliza de diferentes ensaios laboratoriais para obter as densidades *in situ* das rochas: Técnica do Frasco de Areia, Técnica de Meio Denso por Deslocamento de Volume, Técnica do Meio Denso por Preenchimento de Água, Técnica do Gabarito Retangular, Técnica de Abertura de Poços e Técnica Baseada na

Caixa de Testemunho. Ela se utilizou de ferramentas geoestatísticas, para poder produzir as estimativas e, então, comparar os teores de ferro a partir de densidades encontradas por técnica direta (acumulação média) com os valores obtidos nas estimativas de densidade. A autora se utilizou da regressão linear para estimar as densidades, pois sem esta ferramenta estatística as estimativas resultavam em um baixo percentual de blocos estimados. Já as estimativas realizadas com valores obtidos através do CNM mostraram um resultado melhor, pois dependem apenas da composição mineralógica e da porosidade da litologia. Por fim, as regressões lineares seriam mais precisas se, ao invés de fazer a regressão correlacionando apenas teor *versus* densidade, a porosidade fosse incorporada juntamente com o teor. Entretanto, ambas as maneiras de se estimar, seja por métodos diretos ou indiretos mostraram-se eficazes e, portanto, seriam mais recomendadas.

Entretanto o CNM tem algumas limitações, isto porque o cálculo das densidades depende de uma análise granuloquímica do material recuperado no testemunho de sondagem (WEBBER, 2008; ALMEIDA, 2011). Porém nem sempre é possível recuperar o material do testemunho, por exemplo quando se trata de um material muito friável, ou ainda quando os minerais sofreram algum tipo de alteração e passam a constituir agregados compactos (Webber, 2008). Além do mais, o cálculo normativo é uma maneira indireta de se medir a densidade, uma vez que será calculada a partir de densidades dos óxidos que constituem a mineralogia da rocha (cuja densidade é conhecida). Motta *et al.* (2016) compararam ensaios clássicos de laboratório para obter densidade com a metodologia aperfeiçoada por Motta (2014), como resultado o erro entre volume produzido e volume estimado foram reduzidos ao adotar o CNM aperfeiçoado, sem contar que além de obter valores para a densidade, o método se mostrou capaz de calcular a porosidade e as proporções mineralógicas das rochas.

Outro autor que utilizou o CNM foi Braga (2019), que comparou o método com outros três métodos: microtomografia computadorizada, permoporosimetria e picnometria clássica. Foram utilizados três furos de sondagem de aproximadamente 314, 336 e 412 metros respectivamente e a partir do material recuperado os ensaios laboratoriais foram realizados. No que diz respeito ao CNM, o método superestimou a densidade seca e a densidade natural das rochas, além de subestimar os valores de porosidade seca, porém ambos desvios (subestimativa e superestimativa) mostraram-se menores que o erro associado a depósitos sem número representativo de amostras, além de ser capaz de evidenciar a variabilidade do fenômeno geológico ao longo do depósito. Desta forma, o CNM configura uma metodologia

que pode ser considerada útil e eficaz, mas que nem sempre é uma alternativa viável para calcular a densidade das rochas de um depósito dadas suas limitações.

Há um outro método de investigação indireta da densidade, que é realizado com o auxílio da geofísica e pode ser aplicado para a indústria mineral, que é a perfilagem geofísica gama-gama. É importante salientar que algumas empresas expressivas já utilizam a perfilagem gama-gama, entretanto não utilizam diretamente suas informações de densidade para produzir as estimativas dos modelos de blocos. A partir destes conhecimentos, Almeida (2011) analisou o impacto da incorporação dos dados de perfilagem geofísica gama-gama, para aprimorar os dados de densidade em um depósito de ferro do Quadrilátero Ferrífero. Primeiro, a utilização da perfilagem gama-gama pode ser utilizada para litologias maciças, friáveis ou ainda compactas e, portanto, pode auxiliar na medida de densidade dos tipos litológicos cujos ensaios laboratoriais não são possíveis (podendo suprir informações que não foram obtidas via CNM, por exemplo). Além do mais, esta leitura feita pelo equipamento permite que a medida da densidade seja obtida logo após a amostragem por sondagem (testemunho).

Almeida (2011) buscou correlacionar os valores obtidos pela perfilagem geofísica (indiretos) com os ensaios laboratoriais (diretos) para diminuir as chances de erro ou de tendência na estimativa. Cerca de 50% das amostras expressavam correlação entre o método indireto gama-gama e os ensaios laboratoriais. As correlações mostravam-se mais fortes onde as amostras dos testemunhos tinham maior recuperação e, da mesma maneira, apresentavam correlações fracas em testemunhos com menor recuperação do material amostrado, explicitando o problema da recuperação dos testemunhos que por vezes acaba impossibilitando alguns métodos laboratoriais para as amostras. Foi comprovado através de dois diagramas de dispersão que há uma correlação boa entre os valores obtidos da densidade por ensaios diretos (obtida em laboratório) para os indiretos (perfilagem geofísica). É importante salientar que, a variável dependente, foi a perfilagem gama-gama e que o desvio padrão foi de 4,53% no Alvo Dois Irmãos e 4,69% no Alvo Maquiné, isto é, existe uma boa concordância entre o método geofísico e os métodos diretos de ensaios em laboratório. Portanto, a perfilagem gama-gama fornece um valor de densidade, que apesar de indireto, têm um grau de confiabilidade, e portanto, pode e deve ser utilizada, uma vez que as densidades obtidas a partir do método exibiram resultados próximos daqueles obtidos em laboratório,

porém com a vantagem de poder ser realizada in situ e para litologias maciças, compactas e friáveis.

Um estudo de caso realizado na mina Serra Azul, no estado de Minas Gerais, por Reis (2019), faz uma comparação entre utilizar o método convencional da densidade média simples para o depósito *versus* a estimativa de densidade bloco a bloco (onde cada bloco teve uma densidade estimada individualmente). Para construir estas estimativas, os dois modelos contam com o auxílio da geoestatística. De maneira a conseguir avaliar este impacto, o autor utilizou um banco de dados fornecido por uma empresa cuja densidade estimada era a média simples, mas também produziu o seu próprio modelo de blocos, a partir de uma regressão linear e estimou valores de densidade a partir de técnicas geoestatísticas, de tal maneira que cada bloco possuísse a sua densidade de maneira individual. Após os dois modelos de blocos finalizados, foram realizadas as previsões no que diz respeito a otimização da operacionalização da cava final; do sequenciamento de lavra e do dimensionamento dos equipamentos e frotas, além da reconciliação do minério para cada um dos modelos. Foi então constatado que o modelo de bloco cujas densidades eram individuais, além de conseguir representar com fidelidade o comportamento regionalizado da variável densidade ao longo de todo o depósito, foi capaz de fornecer dados mais representativos. Essa representatividade, no estudo de caso de Serra Azul, aumentou a vida útil da mina em um ano, além de aumentar em 6% a massa total do depósito. Entretanto, podemos ter casos em que a estimativa de uma densidade individual para cada bloco diminua a vida útil da mina e a tonelagem total do minério, e tal fenômeno não estaria errado, mas mostraria que o modelo de blocos utilizando a densidade média simples estaria superestimando o depósito, e do mesmo modo, gerando maiores incertezas no modelo.

Já em Crawford (2013) são abordados conceitos acerca da densidade e como calculá-la. Em seu trabalho ele afirma que para a *American Society of Testing and Materials* (ASTM) existem mais de 40 definições diferentes de densidade, a partir do conceito básico inicial de dividir massa por volume. Ele ainda cita a dificuldade em se calcular a densidade para alguns materiais ou corpos, cuja superfície seja muito irregular e, portanto, o volume mal interpretado, ou ainda material muito fraturado ou constituído de um grande volume de pequenas partículas. Tais características acabam se tornando empecilhos, que podem acarretar em erros, que por sua vez venham a inviabilizar um empreendimento. Para exemplificar, o autor cita casos de operações de ouro na Austrália, em que apenas 2 de 35 minas atingiram a

produção esperada do metal de interesse. O erro estaria associado ao fato de assumir uma densidade calculada dos testemunhos recuperados levando em conta os poros, e gerando uma superestimativa no conteúdo metálico dos depósitos.

Reis *et al.* (2021) fizeram um estudo comparando estimativas de densidade para compor a tonelagem de um depósito (cuja litologia era o itabirito compacto) e o impacto destas estimativas no planejamento de mina, utilizando uma média para o depósito e técnicas geoestatísticas a partir da krigagem ordinária. Foi observado que a densidade média era de 3,48 g/cm³ e que os valores de máximo e mínimo eram de 4,2 e 2,76 g/cm³ respectivamente. Ao realizar o modelo através da krigagem ordinária, foi constatado que o modelo obtido através da densidade média produziu uma região de subestimativa, outra de superestimativa e uma terceira em que os valores de densidade estavam próximos para ambos modelos. Onde havia subestimativa havia uma diferença de 3% em relação aos valores obtidos através da estimativa geoestatística. Em termos numéricos, foi constatado no planejamento da mina que, ao considerar a variabilidade regional da densidade, a massa de minério estimado foi 12Mt maior que para o modelo de densidade média e que este número representa um ano a mais de produção na vida útil da mina. Além disso, em depósitos cujo metal é de grande interesse econômico ou com diferentes litologias (que acabam resultando em uma densidade muito variável), o impacto de utilizar um modelo geoestatístico para as densidades vai ser ainda maior (seja aumentando a produtividade, ou reduzindo as chances de ter prejuízos), sendo, portanto, o mais recomendável.

Ainda no que diz respeito às estimativas dos recursos minerais, quando estas eram realizadas em depósitos de forma tabular e não muito profundos, as estimativas geravam produtos mais precisos por se tratarem de depósitos mais simples. Entretanto, quando se tratavam de depósitos em maiores profundidades, com geometria e distribuição dos teores mais complexos, estes estavam sujeitos à modelagem e interpretação com o auxílio de ferramentas tecnológicas. Estas ferramentas, ao contrário do que se imagina, estavam aumentando os erros associados a estas estimativas (SINCLAIR & BLACKWELL, 2004). Para poder atenuar estes erros associados à automatização do processo, foram incorporados os conhecimentos de estatística espacial e da regionalização dos fenômenos, que por sua vez acabaram produzindo modelos e estimativas de alta confiabilidade, e portanto, passaram a ser os mais recomendados e utilizados na indústria mineral. Isso se deve ao fato de as técnicas de estimativa que envolvem krigagem serem considerados estimadores *BLUE* (*best linear*

unbiased estimator), que traduzindo seria: melhor estimador linear sem tendência (ISAACS & SRIVASTAVA, 1989).

Assim, fica evidente tanto a importância de se compreender bem como a densidade está variando espacialmente no depósito (visto o impacto que tal propriedade tem no cálculo da tonelagem de um depósito), quanto a de se produzir estimativas a partir de técnicas geoestatísticas que além de serem estimadores em que se pode calcular o erro associado ao modelo produzido, conseguem fazer relações espaciais entre os fenômenos estudados. Assim, a geoestatística configura papel importante na análise espacial dos fenômenos que, associada às estimativas, colabora para um adequado planejamento e vida útil da mina.

1.3 Meta

A partir das informações recolhidas em estudos prévios no que diz respeito à densidade, bem como as diferentes formas de se obter seu valor em pesquisas na indústria mineral, este trabalho tem como objetivo avaliar o impacto da variável densidade, que compõe um inventário mineral para um depósito de ferro do Quadrilátero Ferrífero. Para isso, serão realizadas estimativas utilizando diferentes bases de dados de densidade, avaliando o impacto na tonelagem total do depósito mineral, determinante para a definição da economicidade e viabilidade do projeto.

1.4 Objetivos específicos

De maneira a atingir a meta proposta e considerando o embasamento teórico necessário, no que se refere às propriedades físicas das rochas, principalmente a densidade, além do entendimento da técnica de perfilagem geofísica gama-gama e da utilização de informações granuloquímicas para obtenção do cálculo normativo mineralógico, foram elencados os seguintes objetivos:

(i) elencar quais são as vantagens e as limitações de cada uma das diferentes bases de dados de densidade;

(ii) produzir estimativas para a densidade e realizar o cálculo da tonelagem do depósito para três bases de dados de densidade diferentes;

(iii) realizar a validação destes modelos produzidos e, ao final, comparar os resultados, verificando o impacto da tonelagem final do depósito ao assumir diferentes bases de dados de densidade, utilizando o método da perfilagem geofísica gama-gama como referência.

1.5 Metodologia

Este trabalho adotou a metodologia que será disposta a seguir para poder alcançar os objetivos anteriormente propostos, a partir do banco de dados utilizado:

(i) revisão de outros trabalhos de relevância para os temas estudados, com um enfoque maior na indústria mineral, mas também na densidade, as diferentes maneiras de calcular esta propriedade e em conceitos acerca das estimativas com o auxílio da geoestatística;

(ii) após este levantamento teórico a partir de trabalhos anteriores (artigos, teses, dissertações e capítulos de livros), serão produzidos variogramas para a variável densidade para cada método de obtenção da mesma;

(iii) a partir dos variogramas serão feitas validações cruzadas para poder definir qual o modelo variográfico mais adequado e que será utilizado;

(iv) com o modelo variográfico definido serão realizadas três estimativas da densidade do depósito, com o auxílio da krigagem ordinária em um modelo de blocos que já foi construído (o mesmo veio junto com o banco de dados que será utilizado para o desenvolvimento do trabalho);

(v) para cada estimativa de densidade produzida será feita uma validação da estimativa, analisando o comportamento dos dados estimados em comparação com os valores verdadeiros, distribuição destes valores, média do erro e a existência ou não de tendência nas estimativas produzidas;

(vi) após a validação das estimativas de densidade, serão calculadas três tonelagens para o depósito, uma para cada abordagem diferente acerca da densidade do mesmo;

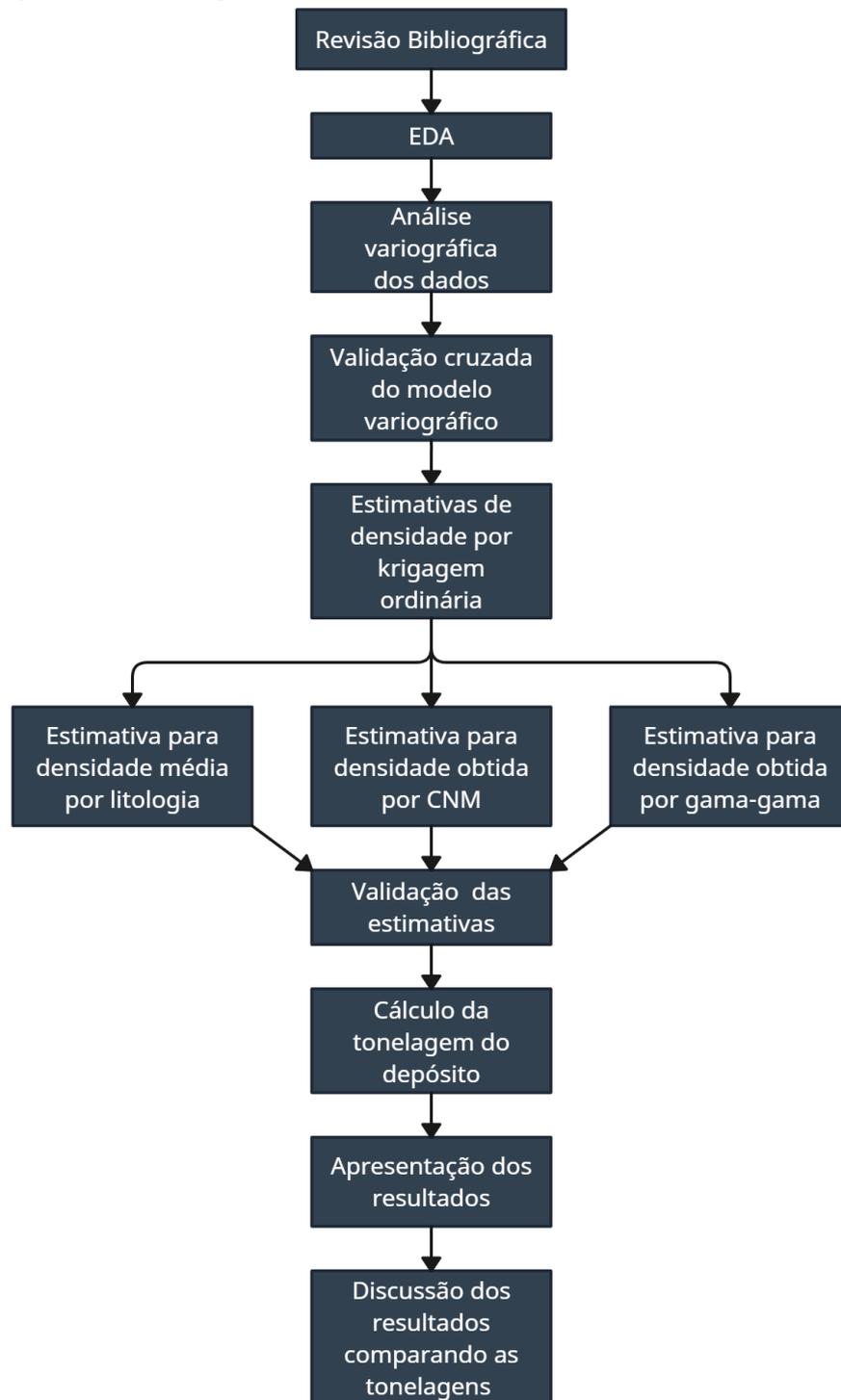
(vii) com o valor das tonelagens de cada uma das estimativas serão feitas discussões acerca dos resultados obtidos, cujo objetivo é avaliar o impacto da utilização de densidades variáveis ao invés de uma densidade média para o depósito.

Além dos passos propostos acima, que fazem parte da metodologia, será verificada a existência de correlação entre o teor de Fe e a densidade, para cada método diferente de calcular a densidade. Esta correlação não é para o cálculo da equação de regressão linear, mas para observar se o teor de Fe aumenta com a densidade, se diminui conforme a densidade aumenta, ou se não possui relação com a diferença nos valores de densidade. Este último passo não foi incluído na lista com as outras etapas da metodologia por não configurar uma

etapa obrigatória na elaboração de estimativas, entretanto é interessante verificar se há alguma relação entre as variáveis teor de Fe e densidade.

Na Figura 1 são apresentadas, de maneira esquemática, as etapas envolvidas e os passos a serem seguidos, de acordo com a metodologia idealizada para realização deste trabalho.

Figura 1 - Fluxograma da metodologia do trabalho.



Fonte: elaborado pelo autor.

1.6 Organização do trabalho

Este trabalho de conclusão de curso foi organizado a partir dos seguintes capítulos:

(i) o capítulo 1 traz uma introdução sobre o tema, a partir de trabalhos realizados com ênfase nos resultados, tanto das estimativas geoestatísticas quanto da importância da densidade para compor a tonelagem de um depósito mineral. Além disso, elenca a meta, os objetivos específicos e a metodologia adotada para a realização do trabalho;

(ii) o capítulo 2 consiste na revisão bibliográfica, nele são apresentados os principais conceitos teóricos acerca da densidade e de estimativas geoestatísticas, que serão importantes para o desenvolvimento do trabalho;

(iii) o capítulo 3 se refere ao estudo de caso, contendo sumário estatístico da variável densidade para cada base de dados, uma revisão do contexto geológico da região denominada de Quadrilátero Ferrífero com informações acerca das formações geológicas e litologias encontradas, principalmente as de relevância para os depósitos ferríferos, incluindo mapas de localização e geológico do Quadrilátero Ferrífero;

(iv) o capítulo 4 é sobre os resultados esperados, onde são discutidos quais os resultados que se espera obter com as estimativas geoestatísticas. Também é apresentado um cronograma do trabalho, de maneira a mostrar o andamento planejado e a viabilidade de execução e conclusão do mesmo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão apresentados os diferentes tipos de densidades existentes, como calculá-las, a relação da densidade com a tonelagem de um depósito mineral, a importância de considerar a densidade variável para diminuir os erros e aumentar o grau de confiança da estimativa. No que diz respeito à estimativa, será feita uma breve revisão das etapas necessárias para produzir estimativas confiáveis, desde a análise exploratória dos dados, análise espacial dos dados, a krigagem ordinária, o modelo de blocos e as técnicas de validação modelo/estimativas.

2.1 Densidade

Como mencionado anteriormente, a densidade é uma propriedade física dos materiais que expressa a razão entre massa e volume de um corpo sendo usualmente expressa em g/cm^3 ou t/m^3 . Para estimativas acerca de recursos e reservas minerais, são necessários três parâmetros: o volume, o teor e a densidade das rochas que contém o mineral de interesse (ABZALOV, 2013). Para fins práticos, na indústria mineral as relações entre minério e estéril lidam com volumes de rocha *in situ* ou material fragmentado cuja porosidade é significativa, que acabaria reduzindo um valor de densidade se considerarmos uma mesma rocha, porém sem a presença de poros (SINCLAIR & BLACKWELL, 2004).

Entretanto, conforme o levantamento realizado por Arseneau (2013), a densidade não vem sendo utilizada da maneira mais apropriada nos inventários de recursos minerais, isto porque na maior parte das vezes o valor atribuído à densidade é um valor médio para todo o depósito, porém algumas vezes a mesma sequer é utilizada. A Tabela 1 e a Figura 2 ilustram a falta de cuidado com a densidade em 50 relatórios técnicos entre estudos de viabilidade prévia da operação e estimativa do recurso propriamente dito.

Tabela 1 - Sumário da abordagem da variável densidade em 50 relatórios técnicos SEDAR (*System for Electronic Document Analysis and Retrieval*).

Tipo de Relatório	Tipo de depósito	Densidade não discutida	Densidade por média simples	Estimada a partir dos dados de densidade	Densidade ponderada	Densidade compondo os dados do ensaio (%)
MRE	metal precioso	4	14	4	0	14%
PEA	metal precioso	0	2	0	0	3%
PFS	metal precioso	3	1	1	0	3%
MRE	metal base	0	3	3	0	11%
PEA	metal base	0	1	0	2	49%
PFS	metal base	0	0	1	0	100%
MRE	pórfiro	1	4	1	0	5%
PEA	pórfiro	1	0	0	0	0%
MRE	metal raro	0	4	0	0	24%
		9	29	10	2	23%

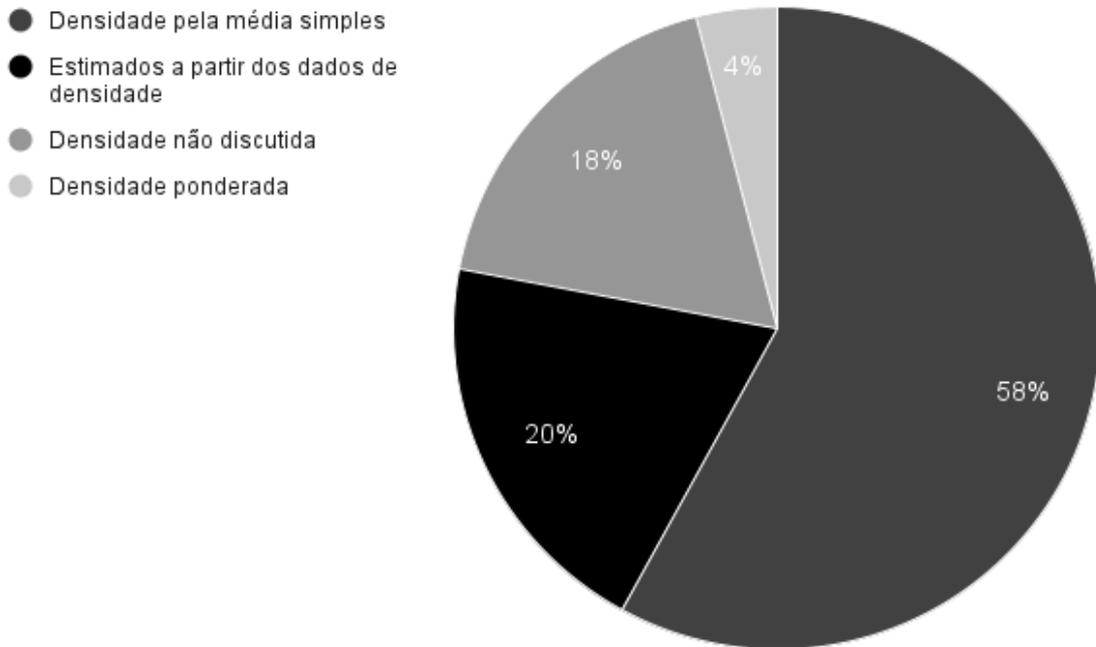
Fonte: extraído e modificado de Lomborg (2021).

MRE - *Mineral Resource Estimate*;

PEA - *Preliminary Economic Assessment*;

PFS - *Pre-Feasibility Study*.

Figura 2 - Gráfico que mostra como 50 empresas reportaram a variável densidade no inventário mineral de operações.



Fonte: extraído e modificado de Lomborg (2021).

Apesar do conceito de densidade ser amplo, são encontrados dois tipos principais de densidade na indústria mineral, a densidade específica (que não considera os poros no material) e a densidade aparente *in situ*, que leva em consideração fatores como porosidade, alterações, oxidações, intrusões entre outros fatores (LOMBERG, 2021).

A densidade específica, é aquela que não considera fator algum nesta relação, apenas a massa e o volume do corpo, e pode ser expressa a partir da Equação 2.1:

$$\rho = m/V \quad (2.1)$$

onde ρ = a densidade; m = massa do corpo; V = volume do corpo. Porém, como essa densidade não leva em conta os poros e outras propriedades geológicas, sua utilização não é amplamente recomendada quando se trata de depósitos minerais (SINCLAIR & BLACKWELL, 2004; LISBOA, 2018).

Já a densidade aparente (em inglês *bulk density*) considera inicialmente a água contida nos poros de uma rocha, e, portanto, podemos ter duas densidades aparentes diferentes, sendo uma para a rocha seca e outra para rocha em seu estado natural, isto é, com água contida nos poros. Assim, a relação se dá pela Equação 2.2:

$$\rho_e = m/V_v + V_s \quad (2.2)$$

onde ρ_e = densidade específica; m = massa; V_v = volume dos espaços vazios e V_s = volume do sólido.

É importante salientar que a fórmula representa a definição da densidade aparente, porém conforme citado anteriormente, no que diz respeito a depósitos minerais, existem fatores geológicos que irão influenciar o seu valor (SINCLAIR & BLACKWELL, 2004; LOMBERG, 2021). Um deles é químico, e é reflexo da composição mineralógica da rocha. Como se sabe, a geologia classifica as rochas como agregados de minerais, divididos entre minerais formadores de rochas, acessórios e traços (vale salientar que alguns elementos químicos ocorrem nas rochas como elementos nativos). Sendo assim, a partir de análises químicas, podemos saber quais minerais compõem aquela rocha, e quais suas quantidades em massa ou porcentagem e, portanto, seria possível determinar a densidade específica para aquela litologia através de um cálculo estequiométrico desenvolvido a partir das densidades específicas dos minerais e elementos químicos que compõem tal litologia e da quantidade dos mesmos presentes na rocha (MOTTA *et al.*, 2016).

Outro fator geológico que pode vir a afetar a densidade, quando se trata de depósitos minerais, é a presença de estruturas como falhas ou fraturas. As fraturas são deformações rúpteis, que acabam por criar espaços vazios nas rochas, e estes por sua vez, podem acabar sendo preenchidos pela água ou outros fluidos e influenciar, portanto, no valor de densidade do material (ALMEIDA, 2011). Já as falhas, são deformações rúpteis em que há movimento nas massas rochosas envolvidas no processo, criando uma descontinuidade no corpo geológico. Tal descontinuidade pode deslocar um corpo horizontal ou verticalmente e assim, afetar a densidade e os teores de um corpo espacialmente ao longo do depósito. Além do mais, no depósito podem haver veios com mineralizações, ou ainda intrusões rochosas que influenciam variando o valor de densidade do depósito de maneira regional (SINCLAIR & BLACKWELL, 2004).

No que diz respeito à porosidade, esta é definida como o volume de espaços vazios em um material (que para nós será um depósito mineral, ou seja, um volume rochoso). Existem três tipos de porosidade, e estes estão ligados à formação dos mesmos, sendo um deles primário ou genético (isto é, formado no próprio mineral que deu origem à rocha, ou durante a compactação dos sedimentos para uma rocha sedimentar) e os outros dois secundários (ou seja, foram resultados de processos pós genéticos, sejam eles por deformação física ou por

dissolução química). São elas: porosidade primária (gerada na gênese das rochas), porosidade secundária (oriunda de processos de deformação, ou por resfriamento ou por fraturamento do material que está sendo deformado) e porosidade cárstica (resultado da dissolução química de minerais de composição carbonática pela ação da água, típico de rochas como mármore e calcários). Quando os poros são preenchidos por água, há uma diferença no valor da densidade do material, isto porque mesmo que a densidade da água seja menor que a das rochas, a água está ocupando um espaço que era inicialmente vazio, e assim, agregando um peso específico por volume ocupado. É importante salientar que, a água não necessariamente irá preencher totalmente o poro (isto é, o poro está parcialmente preenchido por água, e não completamente), e este é um cuidado que se deve ter ao considerar a quantidade de água contida nos poros (ALMEIDA, 2011; BRAGA, 2019).

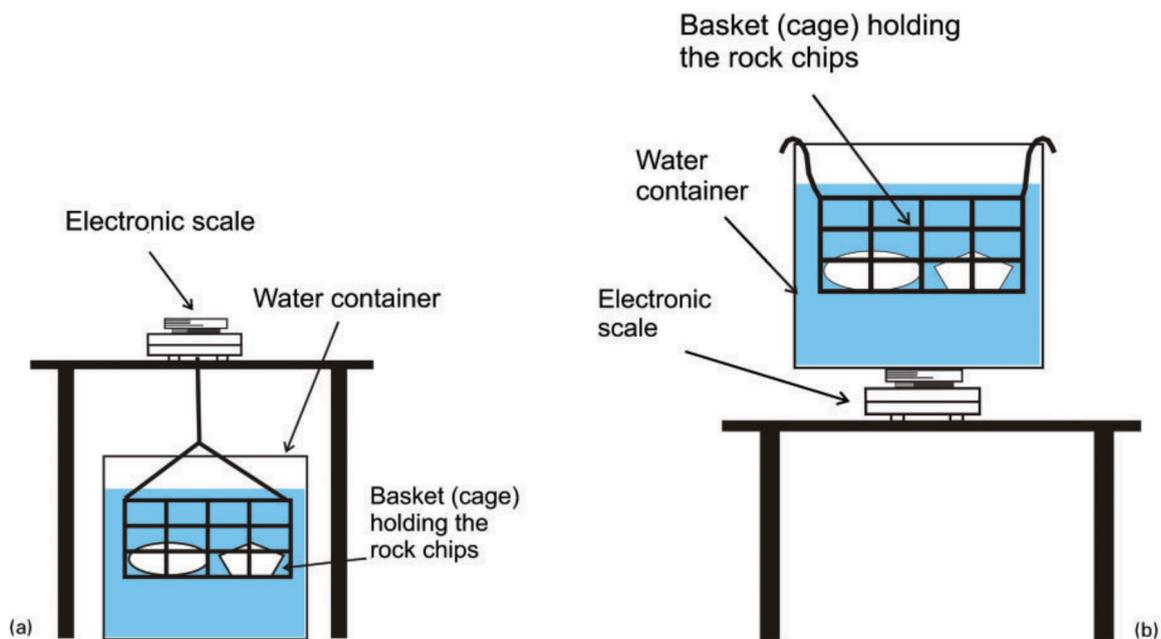
2.1.1 Métodos diretos de obtenção de densidade

Existem diversas técnicas para se determinar a densidade de amostras, sendo algumas mais úteis para rochas friáveis, outras mais aplicadas para rochas compactas, algumas são por ensaios de laboratório empírico com as amostras (e desta forma chamadas de técnicas diretas) e outras chamadas de técnicas indiretas (ABZALOV 2013, ABZALOV, 2016). Makhuvha *et al.* (2014) elencou os diferentes métodos de determinar a densidade aparente *in situ* e os impactos relacionados a estes diferentes métodos. No trabalho, além do estudo de caso, foram listadas dez técnicas de amostragem de densidade adotadas pela empresa *Anglo American*, sendo que cinco das técnicas mostradas eram de operações localizadas no Brasil e para depósitos de minério de ferro. Entretanto, é necessário ressaltar que não há uma regra para dizer se um método é melhor ou pior que outro, mas compreender que alguns métodos não são possíveis de serem realizados por conta das características das amostras a serem analisadas (BRAGA, 2019). É importante salientar que este valor de densidade é calculado para as diferentes litologias que são encontradas no depósito e, posteriormente, a cada litologia é atribuído o valor de densidade obtido por estes ensaios. Dentre os métodos diretos utilizados em depósito de minério de ferro no Brasil nós temos:

(i) técnica de Arquimedes ou deslocamento de água: técnica utilizada para amostras compactas e de baixa porosidade, consiste em colocar um certo volume de água num recipiente, pesar a amostra fora deste recipiente, inserir esta amostra no recipiente e tomar nota do novo volume. Ao realizar este procedimento, fazer o cálculo da densidade aparente

utilizando a diferença do volume inicial pelo volume deslocado na Equação 2.1 que foi apresentada anteriormente; o método está ilustrado na Figura 3 a seguir:

Figura 3 - Ilustração da técnica do deslocamento de água por duas abordagens: a) medindo apenas a cesta que contém as rochas; b) medindo todo compartimento, a água contida, a cesta e as amostras.



Fonte: Abzalov (2013).

(ii) amostra de escavação: este método mostra-se útil para rochas friáveis cuja porosidade é considerável. É realizado com o auxílio de um material de desmonte e transporte de material, como por exemplo uma pá carregadeira de uma escavadeira, onde seu volume (ou capacidade da pá) é conhecido e com a pá cheia é medida a sua massa. Tendo conhecimento da massa e do volume, a densidade é então calculada; o método está representado na Figura 4 a seguir:

Figura 4 - Método de amostra de escavação para obtenção de densidade de rochas.



Fonte: Santos (2006).

(iii) amostra de caixa ou gabarito retangular: tal técnica é utilizada em rochas friáveis de porosidade considerável; para a realização deste método, é aberto um buraco com dimensões de 1m^3 ou $0,5\text{m}^3$ e o mesmo é preparado para a medição, sendo suas paredes impermeabilizadas, e o mesmo preenchido com um volume conhecido de água. Em seguida, um material que foi removido é pesado, e então é transportado até esta caixa (que recebe o nome de gabarito) e depositado. Com isso, sabe-se o volume e a massa ocupada na caixa, e então, é possível conhecer a densidade do material; o método descrito acima está apresentado na Figura 5 a seguir:

Figura 5 - Método do gabarito retangular para obtenção de densidade.



Fonte: Santos (2006).

(iv) substituição de areia: técnica aplicada a materiais friáveis e com porosidade considerável; para a realização da técnica, é necessário selecionar um local para se realizar a amostragem, e escavar uma fenda cuja profundidade e o diâmetro sejam conhecidos. Em seguida, é retirado o material a ser amostrado, e o mesmo é secado. Ao retirar e secar este material, a fenda é preenchida com areia (a densidade desta areia deve ser conhecida) através de uma garrafa específica (que possui forma de funil e um dispositivo que fecha o fluxo do material quando o volume está cheio). Depois se retira esta garrafa, e o conteúdo remanescente em seu interior é pesado, e este conteúdo representa a quantidade de areia que ocupou o espaço vazio que havia anteriormente. Como se conhece a massa tanto do material que foi removido, como do que foi preenchido, e o volume manteve-se, é possível calcular a densidade do material removido. O último método descrito está representado na Figura 6 apresentada a seguir:

Figura 6 - Método da substituição de areia para obtenção de densidade de rochas.



Fonte: Santos (2006).

As outras técnicas para obtenção de densidade de rochas são indiretas e serão abordadas com mais detalhes, pois representam os métodos que compõem a metodologia de obtenção da densidade neste trabalho.

2.1.2 Cálculo normativo mineralógico (CNM)

O cálculo normativo mineralógico consiste em realizar uma quantificação da densidade de uma determinada litologia, a partir do seu conteúdo mineralógico estequiométrico das amostras. Para a sua realização são necessárias duas etapas. A primeira etapa consiste em definir a assembleia mineralógica principal de uma determinada litologia. Em seguida são calculadas as proporções presentes de cada um desses minerais na litologia estudada (MOTTA *et al.* 2016). A partir desta proporção de cada mineral presente na rocha, como a densidade dos minerais é conhecida, é feito um cálculo da densidade média para determinada litologia.

Para determinar a composição mineralógica de uma determinada rocha, são realizadas análises granuloquímicas da mesma. Um dos métodos de análise é a fluorescência de raios x, onde o resultado da análise fornece a quantidade de cada elemento químico presente na rocha que foi amostrada. Porém, este método considera o conteúdo mineralógico como constante ao longo do depósito e, portanto, acaba desprezando os fenômenos regionalizados da dispersão dos minerais ao longo de um depósito mineral (LISBOA, 2018). Outra limitação do cálculo normativo é que ele normalmente não consegue ser aplicado para rochas que são muito friáveis e nem para rochas cujos minerais sofreram alguma alteração e passaram a constituir agregados compactos de minerais (WEBBER, 2008). O impacto desta limitação será visível

no capítulo seguinte, onde os histogramas das amostras cuja densidade foi obtida através do CNM têm um número significativamente menor de amostras, em comparação com os outros dois métodos de obtenção de densidade utilizados.

Motta *et al.* (2016) fez uma comparação entre medidas de densidade *in situ* com densidades obtidas através de uma adaptação do CNM elaborada por Motta (2014), para um depósito de ferro do QF, e a partir de uma boa correlação entre a densidade *in situ* e a obtida pelo CNM concluiu que o CNM pode ser adotado para medir a densidade das rochas. Entretanto, para que o CNM consiga considerar a característica da variabilidade espacial de um depósito mineral, é necessário a realização de testes para saber a porosidade, a saturação dos poros na rocha e a densidade seca da mesma, e a partir destas informações, construir um modelo de blocos que considere todas estas informações para cada bloco individualmente. Outro fator importante de salientar, é que as amostras compactas exibiram melhor coeficiente de correlação (que correlacionam as densidades absoluta com a densidade seca para os materiais friáveis e compactos) do que amostras friáveis devido à uma porosidade maior nas amostras friáveis em relação à compacta. A Tabela 2 a seguir apresenta como definir as normas mineralógicas a partir do conteúdo molecular dos elementos químicos.

Tabela 2 - CNM utilizando proporções de pesos moleculares (% P.M.) dos elementos/óxidos para rochas de minério de ferro desenvolvido por Motta (2014) adaptado a partir de Voicu *et al.* (1997) e Ribeiro (2003).

Apatita [Fórmula: Ca₅(PO₄)(F,Cl,O)]
Utilizando (P ₂ O ₅) -> %P.M. de CaO em (5CaO+P ₂ O ₅ +H ₂ O) multiplicado pelo teor de CaO. Resíduos: P ₂ O ₅ (I) e H ₂ O (I). Se P ₂ O ₅ (I) < 0, temos apatita = 0.
Utilizando (P ₂ O) -> %P.M. de P ₂ O em (5CaO+P ₂ O ₅ +H ₂ O) multiplicado pelo teor de P ₂ O. Resíduos: CaO (I), H ₂ O (I) e wavellita = 0. Se P ₂ O ₅ (I) < 0, então apatita = 0.
Wavellita [Fórmula: Al₂(PO₄)₂(O,H,F)*5H₂O]
%P.M. de P ₂ O ₅ em (P ₂ O ₅ +Al ₂ O ₃) multiplicado pelo teor de P ₂ O ₅ . Resíduos: Al ₂ O ₃ (I).
Talco [Fórmula: Mg₃Si₄O₁₀(OH)₂]
%P.M. de MgO em (3MgO+4SiO ₂ +H ₂ O) multiplicado pelo teor de MgO. Resíduos: SiO ₂ (I) e H ₂ O(II).
Caulinita [Fórmula: Al₂Si₂O₅(OH)₄]
Utilizando (Al ₂ O ₃) -> %P.M. de Al ₂ O ₃ em (2SiO ₂ +2H ₂ O+Al ₂ O ₃) multiplicado pelo teor de Al ₂ O ₃ (I). Resíduos: Al ₂ O ₃ (II), SiO ₂ (II) e H ₂ O (III). Se SiO ₂ (II) > 0, então gibbsita = 0.
Utilizando (SiO ₂) -> %P.M. de SiO ₂ em (2SiO ₂ +2H ₂ O+Al ₂ O ₃) multiplicado pelo teor de SiO ₂ (I). Resíduos: Al ₂ O ₃ (III) e H ₂ O (IV).
Gibbsita [Fórmula: Al(OH)₃]
%P.M. de Al ₂ O ₃ (II) em (3H ₂ O+Al ₂ O ₃) multiplicado pelo teor de Al ₂ O ₃ (II). Resíduos: Al ₂ O ₃ (III) e H ₂ O (IV).
Magnetita [Fórmula: Fe₃O₄]
%P.M. de FeO em Fe ₃ O ₄ multiplicado pelo teor de H ₂ O (IV). Quando não possuir análise de Fe ₃ O ₄ : Cálculo indireto por Equação de Regressão Linear entre Fe ₂ /Fe _T e Profundidade. Resíduo: Fe (I) = teor Fe _{total} - Fe _{magnetita} .
Goethita [Fórmula: FeO*OH]
%P.M. de H ₂ O em (H ₂ O+Fe ₂ O ₃) multiplicado pelo teor de H ₂ O (IV). Resíduos: Fe (II) = Fe (I) - Fe _{goethita} . Se H ₂ O (IV) < 0, então: goethita = 0, Fe (II) = Fe (I).
Hematita [Fórmula: Fe₂O₃]
Hematita = Fe (II)*1,43.
Quartzo [Fórmula: SiO₂]
Quartzo = SiO ₂ (II).
Minerais de Manganês [Óxidos e hidróxidos]
Se (MnO ₂ > 0) Psillomelano = MnO ₂ .
Soma = Apatita + Wavellita + Caulinita + Gibbsita + Talco + Quartzo + Psillomelano + Goethita + Magnetita + Hematita

Fonte: extraído e modificado de Motta (2014).

Com as normas mineralógicas definidas, é possível calcular a densidade específica das rochas através da Equação 2.3 a seguir:

$$\rho_0 = \frac{\sum_{i=1}^n M_{mi}}{\sum_{i=1}^n \rho_{mi}} \quad (2.3)$$

2.1.3 Perfilagem geofísica gama-gama

Existem diversas maneiras de se realizar investigações de natureza geofísica, porém é importante salientar que todas as investigações geofísicas são indiretas. Inicialmente os métodos geofísicos se dividem em dois grandes grupos, dada a natureza de investigação, podendo ser métodos passivos ou ativos, sendo a perfilagem geofísica gama-gama um método ativo (SINCLAIR & BLACKWELL, 2004). Ele é considerado um método geofísico ativo porque depende da emissão de fonte radioativa pelo aparelho que faz a medição (SILVA, 2010). Tal emissão o diferencia do método radioativo passivo (que mede a radiação gama emitida de maneira natural pelas rochas), fazendo com que a perfilagem geofísica gama-gama possa ser chamada também de perfilagem de radiação gama retroespalhada (WEBBER, 2008).

Conforme Almeida (2011) a perfilagem geofísica gama-gama pode ser amplamente empregada por ser considerada um método de baixo custo e por permitir a obtenção de informações acerca da densidade de materiais cujos ensaios laboratoriais não são possíveis (por exemplo os materiais friáveis ou semi-compactos). Assim, a perfilagem geofísica gama-gama surge como um método capaz de ser aplicado em furos de sondagem já existentes e que podem aumentar as informações acerca do depósito investigado, sendo a propriedade investigada por este método a densidade das rochas presentes ao longo dos furos. Além de ser capaz de suprir informações de litologias cujo material não é possível realizar ensaios laboratoriais, a perfilagem geofísica gama-gama pode ser utilizada para incorporar ainda mais o banco de dados acerca da densidade (SILVA, 2010). Assim, combinando diferentes bases de dados de densidade é possível produzir estimativas mais precisas, uma vez que é observada a variação regional da densidade no depósito (LISBOA, 2018).

Conforme foi dito anteriormente, existem diversos métodos geofísicos para investigar as propriedades físicas das rochas. No que diz respeito à densidade, o método mais apropriado é a perfilagem geofísica gama-gama. No caso da perfilagem radioativa gama-gama retroespalhada, são utilizados raios gama para poder determinar a densidade específica de um material, isto porque apenas a radiação gama tem poder penetrativo em rochas e, portanto, é

esta que é utilizada na perfilagem geofísica gama-gama retroespalhada (WEBBER, 2008; SILVA, 2010; ALMEIDA, 2011). Webber (2008) define a radiação gama como sendo uma onda eletromagnética cuja frequência é muito elevada.

O método consiste em utilizar uma fonte radioativa (que normalmente é o cézio), para observar a interação da radiação emitida pelo aparelho com as paredes do furo de sondagem que este percorre (SILVA, 2010). Esta interação que irá ocorrer entre a partícula radioativa e o meio depende do número atômico do material presente no meio, além da energia dos raios gama que incidem neste meio (WEBBER, 2008). A densidade é então calculada a partir do desvio do raio gama radioativo que foi emitido quando o mesmo retorna para o aparelho, que no caso é um cintilômetro (WEBBER, 2008; SILVA, 2010). Este desvio ocorre quando a partícula gama colide com um elétron do átomo.

Esta dispersão do raio gama está associada à coesão dos núcleos atômicos presentes ao longo de toda a composição do furo, e esta coesão, por sua vez, reflete diretamente na diferença de densidade que existe na litologia ao longo do furo (ALMEIDA, 2011). Quanto maior for a coesão de um núcleo atômico, menor é o raio da eletrosfera que o circunda, e, portanto, menor é a chance de uma partícula radioativa colidir com elétrons. Sendo assim, no que diz respeito à relação entre a dispersão e a densidade da litologia, a relação é a seguinte: quanto maior for a densidade do material que a onda radioativa percorre, menor é a dispersão dos raios gama (WEBBER, 2008; SILVA, 2010).

Um fator importante a ser considerado neste método é o diâmetro dos furos ou *caliper*. A importância da variação do diâmetro se dá devido à mesma estar diretamente associada aos processos geológicos, por exemplo, rochas cristalinas geralmente não sofrem variação de diâmetro ao longo do furo, pois são muito resistentes; em contrapartida, nas rochas sedimentares muito finas pode ocorrer desmoronamento de uma porção, e assim, a espessura do furo variar ao longo da profundidade (SILVA, 2010; ALMEIDA, 2011). O *caliper* também é responsável por medir, além do diâmetro dos furos, a rugosidade da parede do mesmo (SILVA, 2010). Tal fator é importante, pois a rugosidade da parede configura uma das fontes de erro na medida de densidade durante a aplicação do método (ALMEIDA, 2011). Desta forma, o *caliper* pode ser considerado como um indicador da mecânica das rochas contidas nos furos (SILVA, 2010).

É este comportamento da variação de densidade, que expressa o comportamento não homogêneo da densidade em um depósito mineral (ALMEIDA, 2011; LISBOA, 2018). Deste modo, este método configura uma ferramenta muito útil que permite uma investigação ao longo de todo o furo de sondagem existente (ALMEIDA, 2011), além de ser capaz de integrar informações importantes acerca da propriedade física das rochas presentes no depósito e facilitar as estimativas geoestatísticas das etapas seguintes (SILVA, 2010). Além do mais, Webber (2008) afirma que o método da perfilagem geofísica gama-gama retroespalhada auxilia na etapa de coleta dos dados, permitindo a obtenção de uma quantidade abundante de informações com baixo custo e em pouco tempo (devido a praticidade do método). Entretanto Weber (2008) recomenda que deve ser feito um estudo detalhado do impacto da rugosidade da parede dos furos na qualidade da informação obtida pelo método.

2.2 Estimativa por técnicas geoestatísticas

Para poder realizar estimativas por técnicas geoestatísticas é necessário antes realizar alguns procedimentos. Os tópicos a seguir se referem às etapas de trabalho necessárias para a realização de estimativas, desde a análise prévia do banco de dados, até a análise espacial dos dados e, posteriormente, as estimativas (que serão realizadas através da krigagem ordinária) e a validação.

2.2.1 Análise exploratória dos dados (EDA)

Para compor estimativas geoestatísticas, recomenda-se primeiro que sejam realizados estudos da estatística univariada e bivariada das variáveis (YAMAMOTO, 2001). Sinclair & Blackwell (2004) afirmam que existe a necessidade de se analisar os dados com atenção, além de realizar as devidas modificações no banco de dados nas etapas que antecedem as estimativas e a realização de um inventário mineral. Assim, a estas etapas de análise prévia dos dados foi atribuído o nome de análise exploratória dos dados.

Segundo Isaaks & Srivastava (1989) esta análise exploratória dos dados vem por meio de ferramentas da estatística clássica, analisando primeiro as variáveis presentes no banco de dados individualmente (estatística univariada) e depois analisando pares de variáveis com o intuito de procurar relações entre estas variáveis (estatística bivariada). Isto porque os dados são mais claros de se interpretar quando estão organizados. Desta forma, a etapa de análise

exploratória dos dados consiste em organizar, apresentar e sumarizar os dados que estão contidos no banco de dados (ISAAKS & SRIVASTAVA, 1989). Sinclair & Blackwell (2004) apontam que através da análise prévia dos dados os seguintes objetivos devem ser atingidos:

- (i) reconhecimento do erro;
- (ii) permitir reconhecer as características estatísticas de todas as variáveis de interesse para a estimativa do recurso/reserva;
- (iii) escrever e compreender a interrelação entre as variáveis de interesse;
- (iv) reconhecer e distinguir domínios geológicos diferentes que devem ser estimados de maneira independente;
- (v) identificar e compreender os *outliers* e valores extremos;
- (vi) calcular a similaridade/dissimilaridade de uma série de dados brutos, em especial amostras com diferentes suportes.

Existem uma série de conceitos estatísticos que analisam as amostras presentes em um banco de dados de maneira univariada e bivariada. Entretanto esta revisão bibliográfica vai focar mais naqueles parâmetros estatísticos que surgirão ao longo deste trabalho.

2.2.1.1 Estatística univariada

Isaaks & Srivastava (1989) apontam que para a compreensão dos dados individualmente são utilizados principalmente os conceitos estatísticos como: média, moda, mediana, máximo e mínimo, variância, desvio padrão, os coeficientes de Skewness e de variação, além de outras medidas estatísticas clássicas. A sumarização destes conteúdos se dá através de resultados obtidos nas tabelas de distribuição de frequências e do histograma construídos para as variáveis.

(i) Histograma: a ferramenta estatística mais básica utilizada para a análises de dados é o histograma (ROSSI & DEUTSCH, 2014). O histograma é uma ferramenta estatística visual que exhibe o comportamento da distribuição das variáveis presentes em um banco de dados.

(ii) Média: de acordo com Isaaks & Srivastava (1989) a média configura a média aritmética de todos os valores presentes no banco de dados. É importante salientar que este

parâmetro é bastante sensível à valores erráticos. A mesma pode ser expressa através da Equação 2.4 a seguir:

$$m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2.4)$$

(iii) Mínimo: o menor valor em um banco de dados é o mínimo.

(iv) Máximo: o maior valor presente no banco de dados é o máximo.

(v) Variância: a variância (σ^2) é um parâmetro que não é comumente utilizado uma vez que envolve o quadrado dos valores calculados. Este parâmetro se mostra sensível quando existem valores erráticos no banco de dados. Pode ser calculada através da Equação 2.5:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - m)^2 \quad (2.5)$$

(vi) Desvio Padrão: o desvio padrão (σ) nada mais é do que a raiz quadrada da variância e é normalmente utilizado no lugar da variância devido à suas unidades serem as mesmas unidades das variáveis que estão sendo descritas (ISAACS & SRIVASTAVA, 1989).

2.2.1.2 Estatística bivariada

Além do estudo das variáveis individualmente, é possível realizar estudos entre pares de variáveis de um banco de dados. Estes estudos recebem o nome de estatística bivariada. A abordagem da estatística bivariada é interessante quando se trata de recursos minerais, uma vez que estão envolvidas múltiplas variáveis (ROSSI & DEUTSCH, 2014). Para poder verificar a existência de uma relação entre as variáveis, são feitas análises em pares de variáveis através de algumas ferramentas estatísticas (ISAACS & SRIVASTAVA, 1989).

A primeira ferramenta é gráfica e se chama *scatterplot* ou em português, diagrama de dispersão. Segundo Sinclair & Blackwell (2004), os diagramas de dispersão configuram uma ferramenta simples, entretanto muito útil para relacionar duas variáveis, além de ser útil para indicar a presença de agrupamentos de amostras e a presença de valores extremos e *outliers*. Estes diagramas são gráficos X-Y em que a coordenada do eixo X é o valor de uma variável e a coordenada do eixo Y é o valor de outra variável (por exemplo teor (X) *versus* densidade (Y)). O *scatterplot* além de fornecer uma impressão qualitativa da relação entre duas

variáveis, também é capaz de chamar a atenção para dados aberratórios (ISAAKS & SRIVASTAVA, 1989). Estes dados aberratórios podem configurar fontes de erro, portanto autores como Isaaks & Srivastava (1989), Sinclair & Blackwell (2004) e Rossi & Deutsch (2014) recomendam que os dados presentes no banco de dados sejam checados e, se necessários, removidos do mesmo. Isto porque o sucesso de qualquer método de estimativa depende de dados confiáveis e mesmo depois de se modificar o banco de dados alguns valores erráticos podem vir a impactar as estimativas (ISAAKS & SRIVASTAVA, 1989). Além dos *scatterplots*, existem outras ferramentas estatísticas que expressam a relação entre duas variáveis, porém expressando esta relação quantitativamente.

(i) Coeficiente de correlação (Pearson): o coeficiente de correlação é a estatística que é mais comumente utilizada para sumarizar a relação entre duas variáveis (ISAAKS & SRIVASTAVA, 1989). Este coeficiente varia de -1 a 1, as amostras são chamadas de correlatas se o valor do coeficiente for menor que -0,6 (correlação negativa) e maior que 0,6 (correlação positiva). Além do mais estes valores indicam uma relação linear entre as variáveis, isto é, se o coeficiente for igual a -1 o *scatterplot* será composto por pontos formando uma linha reta decrescente. Em contrapartida, se o coeficiente for igual a 1, o *scatterplot* será composto por pontos formando uma linha reta crescente. Esta relação linear permite calcular a equação de regressão linear. O coeficiente de correlação (ρ) pode ser afetado por pares aberrativos (ISAAKS & SRIVASTAVA, 1989) e pode ser obtido a partir da Equação 2.6 apresentada a seguir:

$$\rho = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - m_x)(y_i - m_y)}{\sigma_x \sigma_y} \quad (2.6)$$

(ii) Coeficiente de correlação de *rank* (Spearman): o coeficiente de correlação exibe uma relação linear entre duas variáveis, entretanto a relação entre duas variáveis pode não ser necessariamente linear e, portanto, o coeficiente de correlação pode ser uma estatística pobre para expressar a relação entre estas variáveis (ISAAKS & SRIVASTAVA, 1989). Assim, uma ferramenta estatística útil é o coeficiente de correlação de *rank*. Para encontrar os *ranks* de uma variável deve-se ordenar os valores da mesma em ordem crescente e observar onde cada valor cai. O menor valor vai receber o *rank* 1 e o maior valor vai receber o *rank* “n”. O

mesmo é feito para a outra variável e o valor do coeficiente de correlação de *rank* pode ser calculado a partir da Equação 2.7 apresentada a seguir:

$$\rho_{rank} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (R_{xi} - m_{Rx})(R_{yi} - m_{Ry})}{\sigma_{Rx} \sigma_{Ry}} \quad (2.7)$$

2.2.1.3 Desagrupamento de amostras

Como foi falado anteriormente, além dos valores extremos e *outliers*, o agrupamento preferencial de amostras pode afetar alguns parâmetros estatísticos. Desta forma, o próximo passo depois de identificar e tratar corretamente os valores extremos e *outliers* deve ser verificar a existência ou não de um agrupamento de amostras.

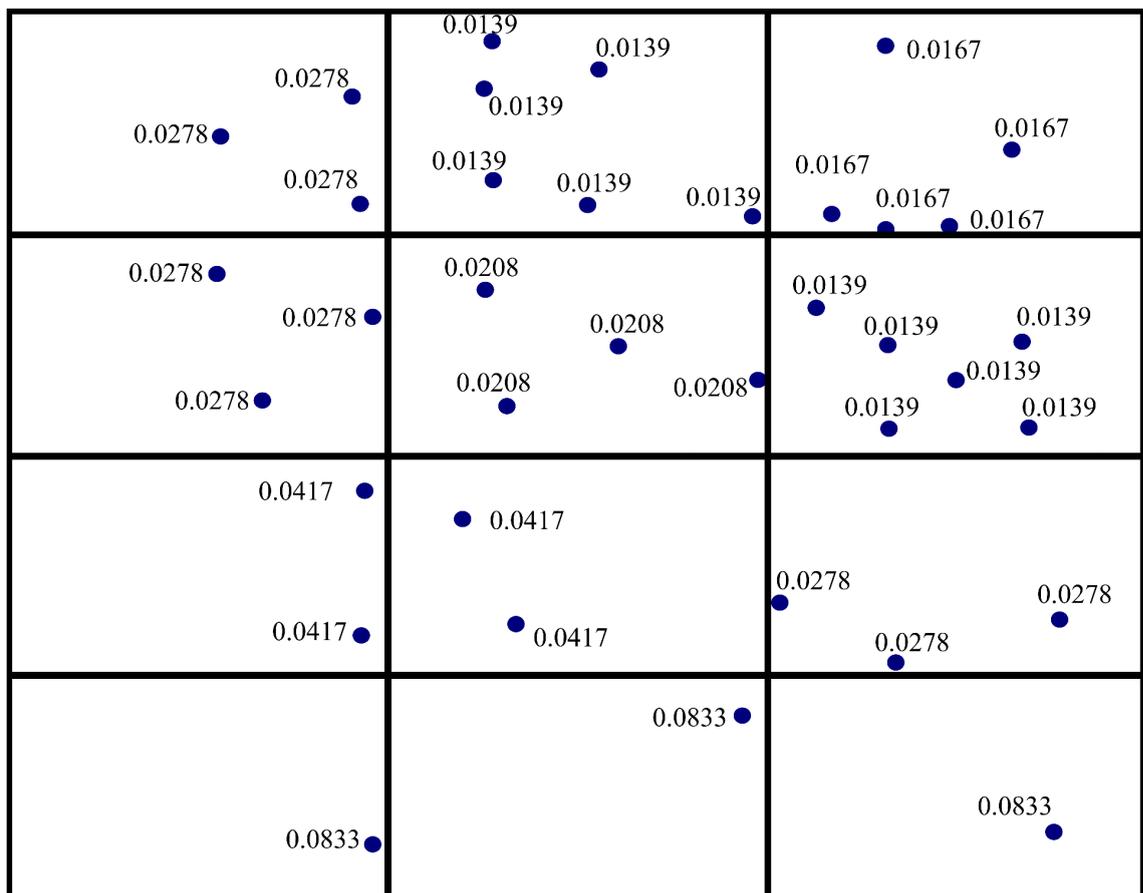
O agrupamento de amostras é algo natural, uma vez que pode ser resultado de um adensamento da malha durante a sondagem, ou ainda a investigação em uma área de maior potencial em comparação a outras regiões da área de estudo. Davis (2002) afirma que a análise de agrupamento é o nome dado a uma série de técnicas, cuja intenção é agrupar indivíduos que possuam características similares, que passam a constituir um grupo em que os indivíduos possuam um comportamento mais ou menos homogêneo e distinto de outros grupos. Entretanto, por mais que o fenômeno do agrupamento de amostras seja natural, realizar análises estatísticas de dados geológicos é complicado quando a densidade amostral varia em diferentes áreas de um depósito (ABZALOV, 2016). Isto ocorre porque normalmente a média estimada varia significativamente da média exaustiva.

Desta forma, caso haja um agrupamento de amostras é necessário fazer um desagrupamento das mesmas. Isto porque um agrupamento de amostras gera estatísticas que representam bem o comportamento da região agrupada, mas que não são representativas para a área remanescente (ISAAKS & SRIVASTAVA, 1989). O agrupamento de amostras acaba impactando as medidas de tendência central, sendo a média a mais afetada. O processo de desagrupamento consiste em atribuir pesos individualmente para as amostras, de tal maneira que as amostras agrupadas não prejudiquem o processo de estimativa (ISAAKS & SRIVASTAVA, 1898; ABZALOV, 2016).

O método das células móveis consiste em dividir a área estudada em áreas menores de tamanho igual chamadas de células. As amostras recebem um peso inversamente proporcional

ao número de amostras que contém naquela célula (ISAAKS & SRIVASTAVA, 1989). Como as áreas que contém um agrupamento de amostras vão ter mais amostras por célula do que células sem agrupamento, o peso que estas amostras recebem serão menores que os pesos das amostras em regiões desagrupadas. Deve ser tomado um cuidado no método das células móveis, para a escolha do tamanho das células, isto porque se as células forem muito pequenas pode ocorrer de cada amostra ocupar uma célula e, portanto, todos os pesos seriam o mesmo e a média seria a mesma, porém se a célula for grande demais, todas as amostras estarão ocupando a mesma célula e novamente o peso das amostras seriam todos iguais e a média seria a mesma (ABZALOV, 2016). A Figura 7 a seguir ilustra o método.

Figura 7 - Ilustração do método de desagrupamento de amostras através das células móveis.



Fonte: extraído e modificado de Abzalov (2016).

2.2.2 Análise espacial dos dados

Após todas as análises feitas no banco de dados e das tomadas de decisão acerca do seguimento do trabalho, pode ser iniciado o estudo acerca da continuidade espacial das amostras. Este estudo é importante pois ele vai impactar diretamente as estimativas que virão

a seguir no trabalho, uma vez que o peso atribuído às amostras no processo de estimativa é resultado da continuidade espacial da variável a ser estimada (densidade, teor, volume, espessura, etc.). Este impacto se dá devido à existência da estruturação espacial na maioria dos bancos de dados de geociências. Desta forma, duas amostras próximas tendem a ter valores mais similares do que duas amostras distantes (ISAAKS & SRIVASTAVA, 1989).

Assim, quando analisamos um mapa de localização das amostras os valores das variáveis não aparentam ter uma distribuição aleatória, mas os valores baixos tendem a estar próximos aos valores baixos e valores altos próximos de valores altos. Desta forma é mais vantajoso buscar zonas de altos valores anômalos, justamente por esta tendência de valores altos se concentrarem próximos a outros valores altos (ISAAKS & SRIVASTAVA, 1989). E como foi frisado anteriormente, um valor muito baixo circundado de valores altos normalmente levanta suspeita. Algumas ferramentas utilizadas nos sumários estatísticos anteriores podem ser utilizadas para observar a relação entre o valor de uma variável em um ponto com o valor da mesma variável nas amostras no entorno. Além disso, é possível utilizar os *scatterplots* como uma ferramenta de análise da continuidade espacial de uma variável entre as amostras.

A ferramenta matemática que foi capaz de expressar esta relação espacial para fazer estimativas cada vez mais assertivas, foi a geoestatística. Esta ferramenta surgiu no século XX com o intuito de se estudar os fenômenos geológicos de maneira espacial, isto é, considerando a regionalização que um fenômeno possui e que somente através de técnicas e abordagens de estatística básica não era possível, sem contar que o uso da geoestatística permitiria melhores planejamentos e tomadas de decisões, além da diminuição nas chances de prejuízos financeiros (MATHERON, 1963). Abzalov (2016) define a geoestatística como sendo um conjunto de técnicas que é capaz de quantificar a continuidade espacial de uma determinada variável.

Assim iniciou-se um estudo que fosse capaz de compreender, expressar e calcular informações espacialmente relevantes a um depósito, como por exemplo a geometria do corpo de minério ou a concentração e disposição dos teores mais elevados em uma direção preferencial ao longo do mesmo (MATHERON, 1963). Isto porque apenas com os estudos de estatística univariada e bivariada dos dados não era possível compreender o comportamento

espacial dos fenômenos encontrados no depósito (por exemplo uma direção preferencial para os maiores e menores teores).

Para poder compreender os conceitos geoestatísticos, é necessário compreender a dependência espacial. Sinclair & Blackwell (2004) exemplificam esta dependência com um exemplo relativamente simples, se considerarmos duas amostras próximas o teor de ambas tende a ser um valor parecido, não idêntico, porém próximos. Este controle espacial, no que diz respeito a geologia depende de fatores como a continuidade do corpo de minério, a existência de um ou mais domínios, a mineralogia da(s) litologia(s), a existência de estruturas (fraturas, dobras ou falhas), que podem vir a afetar como algumas variáveis irão ser distribuídas ao longo do depósito (como por exemplo a densidade ou o teor).

Desta forma as diferentes maneiras que estas propriedades influenciam o corpo de minério acabam criando um comportamento anisotrópico para o depósito, isto é, que o mesmo não se comporta de maneira uniforme e simétrica. Sendo assim, ao longo de um depósito que apresenta anisotropia serão observadas zonas de maiores teores, zonas de menores teores, zonas de teores intermediários seguindo uma certa orientação espacial e esta orientação de maior e menor continuidade de algum fenômeno geológico irá definir o elipsoide de anisotropia. A ferramenta necessária para estudar estes fenômenos espacialmente são os variogramas.

2.2.2.1 Variogramas

Matheron (1963) define o variograma como sendo uma curva capaz de representar o grau de continuidade de uma mineralização. Logo ele é capaz de explicar como um mineral de interesse está se comportando dentro de certo volume rochoso. O conhecimento deste comportamento, por sua vez permite realizar estimativas cuja precisão é alta e o erro associado à elas é conhecido, (YAMAMOTO, 2001). Abzalov (2016) afirma ainda que o variograma é uma ferramenta geoestatística especial, cuja aplicação é modelar a continuidade espacial das variáveis estudadas.

Somente a partir dos variogramas que é possível reconhecer a anisotropia de um fenômeno, isto é, qual a direção de menor e maior continuidade com que o fenômeno está ocorrendo (outras ferramentas como vimos anteriormente podem auxiliar a enxergar uma direção de maior e menor continuidade). Sinclair & Blackwell (2004) consideram os

variogramas como sendo a ferramenta fundamental da geoestatística. Os variogramas podem ser considerados ainda como uma medida da variabilidade geológica *versus* a distância (ROSSI & DEUTSCH, 2014). Entretanto alguns cuidados devem ser tomados antes de calcular os variogramas experimentais. Os dados devem ser visualizados e compreendidos de uma perspectiva geológica, um sistema de coordenadas apropriado deve ser estabelecido, valores extremos e transformações nos dados utilizados devem ser consideradas (ROSSI & DEUTSCH, 2014).

A função variograma $2\gamma(h)$ é definida como sendo a esperança matemática do quadrado da diferença entre os valores de pontos no espaço, separados por uma distância (h), (YAMAMOTO, 2001). Esta é expressa através da Equação 2.8:

$$2\gamma(h) = E\{[Z(x+h) - Z(x)]^2\} \quad (2.8)$$

onde: $2\gamma(h)$ é a função variograma e $Z(x)$ é o valor da variável no ponto (x) e $Z(x+h)$ é o valor da variável no ponto ($x+h$). Entretanto, muitas vezes o termo variograma é usado para se referir ao semivariograma (que nada mais é do que a metade da função variograma) (YAMAMOTO, 2001; SINCLAIR & BLACKWELL, 2004). A fórmula do semivariograma está apresentada na Equação 2.9 a seguir:

$$\gamma(h) = E\{[Z(x+h) - Z(x)]^2\} \quad (2.9)$$

Além disso, os variogramas são construídos para várias direções, justamente para verificar qual a direção de maior continuidade e qual a direção de menor continuidade do fenômeno estudado e assim definir o elipsoide de anisotropia. Estes são os variogramas experimentais e são eles que possibilitam posteriormente a estimativa por krigagem ordinária (pois vão influenciar o peso que cada amostra irá receber na hora de executar a krigagem). Estes variogramas experimentais devem ter no mínimo quatro direções e no máximo oito direções. Isto porque a tolerância angular ideal seria de $11,25^\circ$ para as amostras, entretanto na maioria dos casos não são encontradas pares de amostras suficientes e, portanto, normalmente se utiliza uma tolerância angular de $22,5^\circ$.

Os variogramas não representam a totalidade ou os detalhes pontuais de uma mineralização, mas expressa uma forma sintética das características essenciais da mesma,

(MATHERON, 1963). Tais funções são caracterizadas por três elementos principais segundo Rossi & Deutsch (2014):

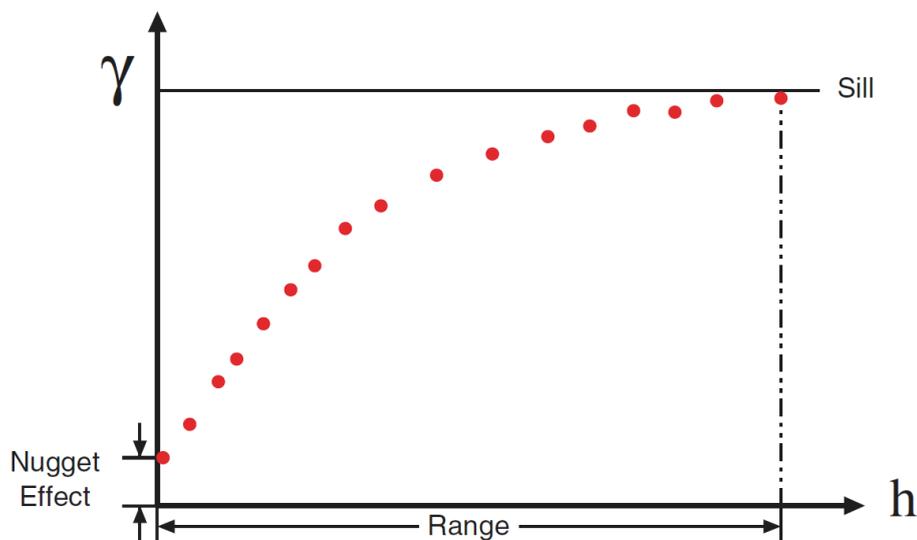
(i) *sill* ou patamar (C) é quando a curva atinge o mesmo valor de variância que a variância das amostras, que significa que não existe mais uma correlação linear entre os valores e graficamente é quando a função exibe um platô;

(ii) *range* ou alcance (a) é a distância em que a correlação passa a ser inexistente, ou seja, é a distância em que a função atinge o seu patamar;

(iii) *nugget effect* ou efeito pepita (C_0) é o valor do variograma em distâncias maiores que o tamanho das amostras e representa uma variabilidade de pequena escala.

Estes elementos estão representados na Figura 8 a seguir.

Figura 8 - Gráfico de variograma exemplificando os elementos (i), (ii) e (iii).



Fonte: Rossi & Deutsch (2014).

Outro fator importante é que a correlação entre $Z(x)$ e $Z(x+h)$ é positiva até o patamar e negativa do momento em que atinge o patamar em diante (ROSSI & DEUTSCH, 2014). Para construir o variograma é necessário delimitar os parâmetros adotados para a construção dos variogramas experimentais. Estes parâmetros estão listados abaixo além da Figura 9 que exemplifica estes parâmetros:

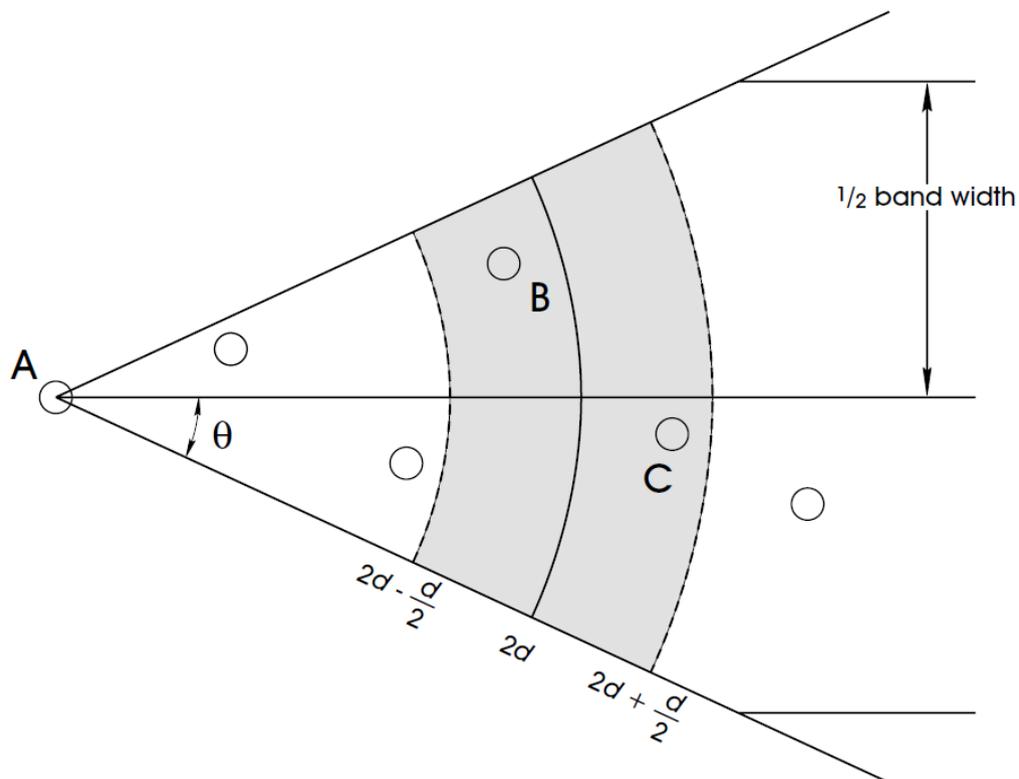
(i) *lag* (h) é a distância que será adotada entre pares de amostras e no variograma ocupa o eixo das abscissas (x), normalmente o *lag* deve ter seu tamanho igual a malha se esta for regular ou então o valor da média do espaçamento entre as amostras se a malha for irregular;

(ii) tolerância de *lag* é adotada para caso não existam pares de amostras para o valor inicial de *lag*, portanto normalmente se adota a metade do valor do *lag* como tolerância;

(iii) tolerância angular é um valor estipulado para uma abertura maior em graus caso não sejam encontrados pares de amostras suficientes no ângulo inicialmente estipulado;

(iv) *bandwidth* é a largura máxima de busca, logo é a largura estipulada para se encontrar a correlação entre pares de amostra, de tal maneira que somente pares de amostras que estejam dentro desta largura estipulada serão consideradas.

Figura 9 - Exemplo de *lag*, tolerância de *lag*, tolerância angular e *bandwidth*.

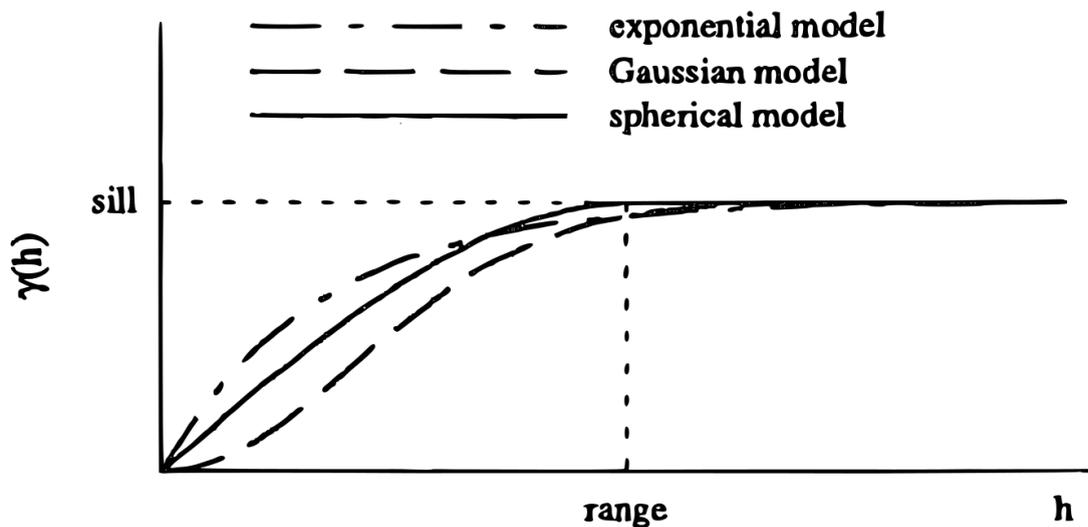


Fonte: Sinclair & Blackwell (2004).

É importante ressaltar que estes parâmetros são estipulados por tentativa e erro, além de não existir uma convenção ou referência dos melhores a serem adotados. Entretanto, é importante salientar que, se as tolerâncias forem muito pequenas o variograma irá apresentar

muitos ruídos (*noisy*), porém se as tolerâncias forem muito grande a continuidade espacial do variograma serão imprecisas. Desta forma o ideal seria a utilização dos menores valores possíveis para as tolerâncias angular e de *lag*, (ROSSI & DEUTSCH, 2014). Existem três funções mais comumente utilizadas para ajustar o modelo variográfico, que são a exponencial, a gaussiana e a esférica. Cada uma delas está associada a uma taxa de crescimento da variância dos pares de amostras até atingir o patamar. A Figura 10 a seguir contempla estas três funções:

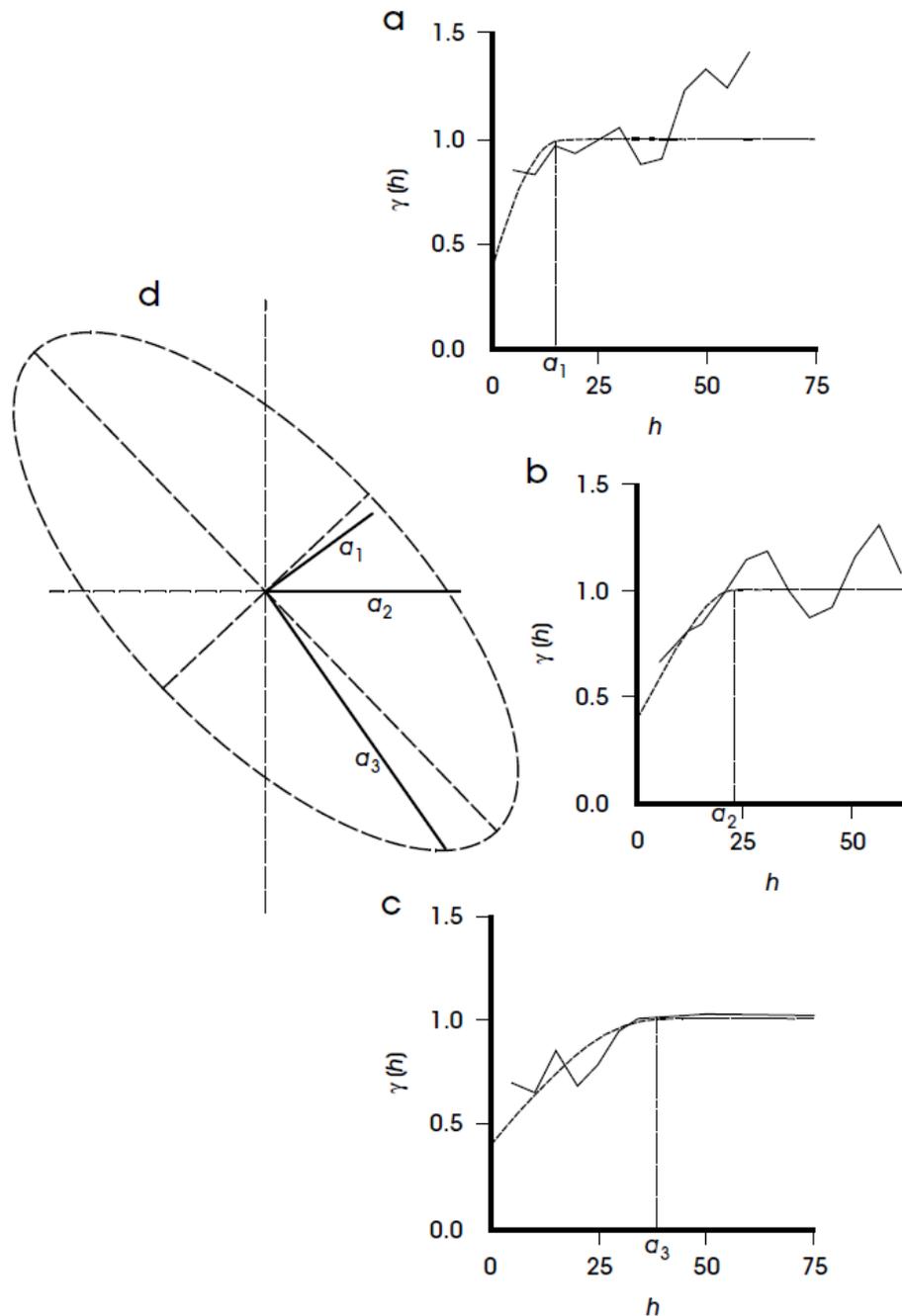
Figura 10 - Tipos de funções matemáticas mais comuns que se utilizam para ajustar a curva do variograma.



Fonte: extraído e modificado de Isaaks & Srivastava (1989).

Com os variogramas experimentais modelados, é esperado que se tenham diferentes alcances para cada uma das direções adotadas na construção. Estes diferentes alcances explicitam a anisotropia presente no comportamento do depósito. As direções do variograma experimental cujo valor do alcance (a) for o maior representa a direção de maior continuidade do fenômeno estudado, logo a direção cujo valor de alcance for o menor, representa a direção de menor continuidade e assim se define o elipsoide de anisotropia a partir dos variogramas experimentais modelados. São estes variogramas experimentais modelados que irão permitir o processo de estimativa por krigagem ordinária (é importante ressaltar que existem outros tipos de krigagem além da ordinária). Isto porque é a partir destas direções de maior e menor continuidade e dos valores de alcance que serão atribuídos os pesos para as amostras, que posteriormente irão compor as estimativas. A Figura 11 mostra um exemplo de elipsoide de deformação definido a partir de variogramas direcionais experimentais.

Figura 11 - Elipsoide de anisotropia (d) definido a partir dos variogramas direcionais experimentais (a,b e c).



Fonte: Sinclair & Blackwell (2004).

2.2.2.2 Krigagem ordinária

Com as direções de maior, intermediária e menor continuidade definidas, é possível calcular os pesos das amostras e realizar a estimativa, que no caso deste trabalho serão realizadas por meio da krigagem ordinária. O termo krigagem é um termo genérico utilizado pelos geoestatísticos que englobam uma série de técnicas de estimativa cujo erro da variância

é mínimo (YAMAMOTO, 2000). O problema geral a ser resolvido pela krigagem é para fornecer a melhor estimativa possível de um ponto ou bloco desconhecido a partir de um conjunto de amostras conhecidas (ALBUQUERQUE, 2021).

É importante salientar que existem diferentes krigagens. De maneira geral o que difere as krigagens umas das outras é a assumpção que é feita acerca da média dos dados, sendo estas uma média local ou uma média estacionária (ROSSI & DEUTSCH, 2014). Porém, todas as técnicas de krigagem são consideradas como estimadores *BLUE* “*best linear unbiased estimator*” (ISAAKS & SRIVASTAVA, 1989). Esta sigla pode ser traduzida como “melhor estimador linear sem tendência”.

(i) é considerado o melhor por buscar diminuir ao máximo a variância do erro das estimativas.

(ii) o linear é devido ao fato de que os pesos atribuídos às amostras no processo de estimativa são combinações lineares dos dados disponíveis;

(iii) o fato de ser sem tendência é pelas técnicas produzirem estimativas que buscam uma média do erro residual o mais próximo do 0 possível;

A krigagem ordinária pode ser expressa pela Equação 2.10 a seguir:

$$z^*(h) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(h_i) + \left[1 - \sum_{i=1}^n \lambda_i \right] \cdot m \quad (2.10)$$

Onde m é a média, que é desconhecida; z é a variável conhecida e z^* é a variável que se quer estimar; λ é o peso de cada amostra calculado a partir do modelo dos variogramas experimentais e h é a localização da amostra.

O somatório dos pesos (λ) deve ser igual a 1 e é importante ressaltar que, na krigagem, as amostras podem receber pesos negativos, de tal maneira que não é obrigatório que os pesos sejam maiores que 0. Assim as estimativas para os pontos não amostrados podem ser realizadas, uma vez que o teor das amostras é conhecido, bem como o peso destas amostras também e a posição.

2.2.2.3 Modelo de blocos

Para poder produzir as estimativas é necessário primeiro definir qual a abordagem a ser utilizada, se serão feitas estimativas pontuais ou se serão feitas estimativas por blocos. Isto porque em estudos de ciências da Terra, o tamanho da amostra tem influência. Esta influência está expressa na relação existente entre o tamanho ou “suporte” dos dados e a distribuição dos valores (ISAAKS & SRIVASTAVA, 1989). Para exemplificar esta relação entre o tamanho da amostra e sua distribuição, podemos imaginar um depósito de ouro. Se optarmos para este depósito uma amostragem composta de fragmentos de rocha de tamanho muito pequeno, acarretaria em uma variabilidade muito grande, isto porque alguns pedaços pequenos de rochas poderiam conter muito ouro (ou ser constituído totalmente de ouro) e outros poderiam não conter conteúdo algum de ouro.

Para evitar que ocorra este efeito de grande variabilidade entre as amostras, Isaaks & Srivastava (1989) recomendam fazer a amostragem para este depósito de ouro, através de carregamentos de caminhões, uma vez que haveria a mistura de materiais com altos e baixos teores de ouro oriundos de amostras maiores (caçambas de caminhões cheias) resultando em valores menos erráticos.

A partir do exemplo anterior podemos compreender melhor as estimativas de pontos e as estimativas de blocos. As estimativas pontuais podem acarretar esta alta variabilidade entre os dados estudados e, portanto, utilizar um modelo de blocos para compor as estimativas pode diminuir este efeito. Estes blocos são na verdade a divisão de toda a área de estudo em regiões de tamanho igual, onde cada bloco contém um determinado número de amostras e de tal maneira que todas as amostras estejam contidas no total de blocos presentes no modelo. Rossi & Deutsch (2014) afirmam que a grande maioria das estimativas envolvendo recursos minerais são obtidas através dos modelos de blocos, sendo as exceções normalmente nos estágios iniciais de prospecção, por não serem utilizadas técnicas de modelagem computacional. Abzalov (2016) afirma ainda que a estimativa por blocos é uma técnica robusta, que apresenta um bom resultado e é utilizada no que diz respeito a aplicações a geologia de mina, porém demanda muito tempo para ser aplicada. Esta alta demanda de tempo, é consequência da estimativa obtida para cada bloco ser o resultado de uma série de estimativas pontuais (de pontos que estão contidos naquele bloco), que ao se reproduzir a

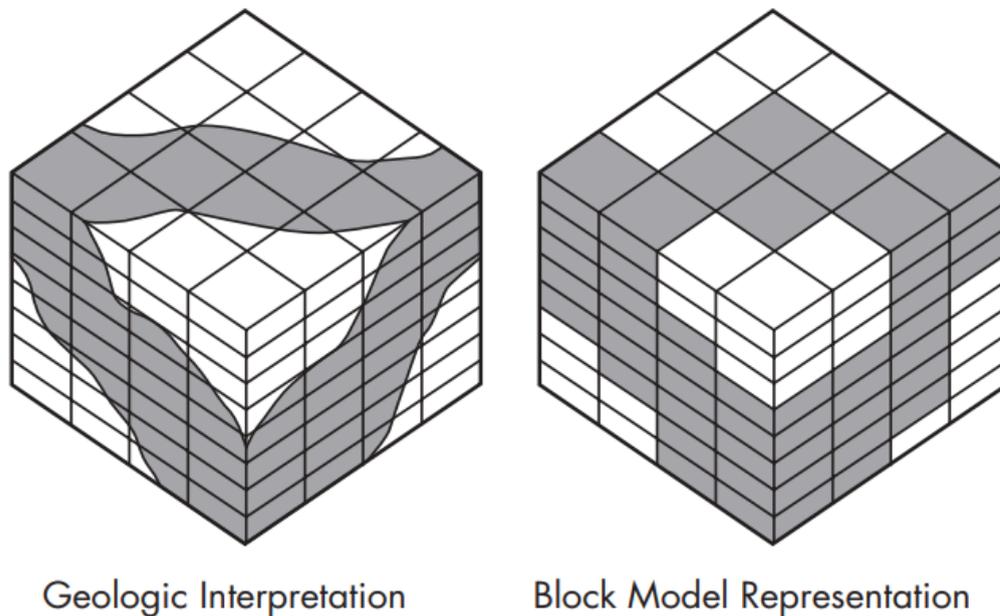
mesma técnica para todo o depósito acaba se tornando um processo que consome muito tempo (ABZALOV, 2016).

A aplicação de estimativas através de modelos de blocos é possível tanto para os bancos de dados 2D quanto 3D (porém para os modelos 2D o bloco não teria dimensões no eixo “Z”, apenas em “X” e “Y”). Os modelos 2D são mais indicados para depósitos sedimentares em que a estratigrafia controla a mineralização, além de depósitos evaporíticos, como depósitos de carvão, depósitos de urânio, depósitos de minerais industriais (nitratos e boro), entre outros. Já os depósitos 3D são mais indicados para depósitos tipo pórfiro cuprífero, depósitos de sulfetos massivos, depósitos tipo *skarn*, depósitos tipo veios ou ainda depósitos tabulares que têm um desenvolvimento significativo na terceira dimensão (ROSSI & DEUTSCH, 2014).

Entretanto, para ser capaz de realizar estimativas confiáveis, é necessária a construção de um modelo de blocos adequado para o contexto geológico local. O tamanho do bloco deve ser decidido baseado principalmente no espaçamento entre as amostras dos furos de sondagem, além de outras considerações do ramo da engenharia. Para calcular o tamanho de bloco ideal a ser adotado no modelo, Journel & Huijbregts (1978) propõem que os blocos tenham um tamanho menor que o espaçamento médio entre as amostras, devendo ser adotado 1/2 ou 1/3 do espaçamento entre as amostras.

Outro fator importante a ser considerado na construção do modelo de blocos são as características geológicas que condicionam o depósito, de tal maneira que a geometria do modelo de blocos respeite a geometria dos fenômenos geológicos presentes no depósito (ROSSI & DEUTSCH, 2014). A Figura 12 abaixo nos ajuda a compreender esta relação entre geometria da geologia do depósito e a geometria dos blocos.

Figura 12 - Representação de um modelo de blocos.



Fonte: Darling (2011).

2.2.3 Validação Cruzada

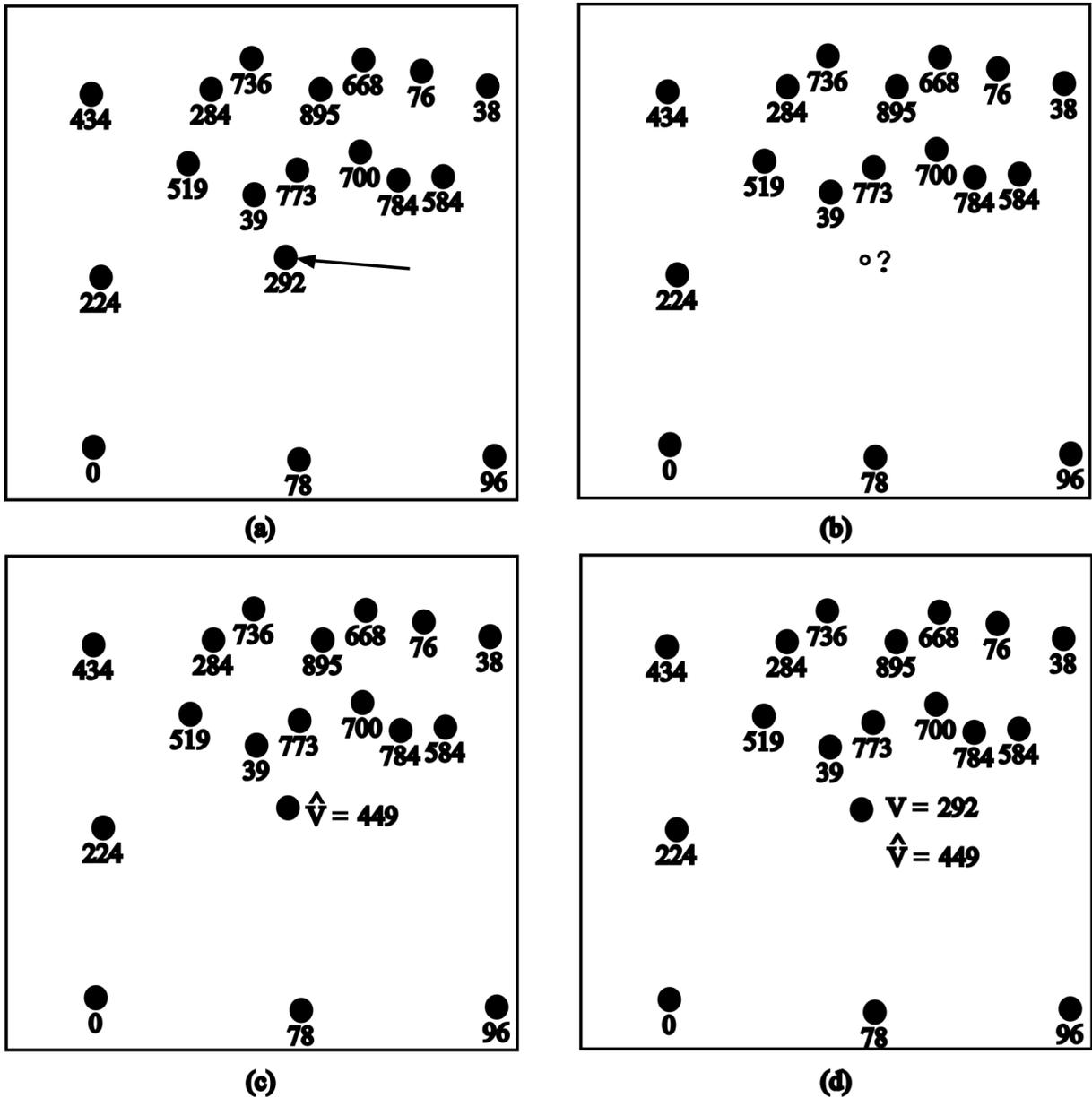
O estudo da validação cruzada pode auxiliar na escolha de diferentes procedimentos de ponderamento, diferentes estratégias de busca ou diferentes modelos variográficos. Porém, infelizmente na prática, os resultados da validação são mais comumente utilizados para comparar a distribuição dos erros de uma estimativa ou dos valores residuais de diferentes processos de estimativas (ISAAKS & SRIVASTAVA, 1989).

O procedimento definido como validação cruzada consiste em remover uma amostra do banco de dados cujo valor é conhecido, realizar uma estimativa para aquela amostra utilizando as outras amostras do banco de dados e comparando o valor estimado com o valor real da variável para aquele ponto, repetindo o procedimento para todas as amostras do banco de dados (ISAAKS & SRIVASTAVA, 1989; SINCLAIR & BLACKWELL, 2004; ROSSI & DEUTSCH, 2014). A comparação entre os valores estimados e os valores verdadeiros permitem observar se existe tendência na estimativa, fornecer a média do erro através do histograma do erro ou ainda analisar a correlação através do *scatterplot* valores estimados *versus* valores conhecidos (SINCLAIR & BLACKWELL, 2004).

Sinclair & Blackwell (2004) reforçam a importância de um modelo de alta qualidade (confiabilidade) no que diz respeito à variografia, além de seu impacto no processo de

estimativa, de tal maneira que a validação cruzada do modelo variográfico configura procedimento essencial para estimativas envolvendo krigagem. Rossi & Deutsch (2014) afirmam que o melhor modelo variográfico será aquele que fornecer a menor média do erro. De acordo com Abzalov (2016), o método de validação cruzada é popular entre os geólogos da mineração, além de ser amplamente empregado para validar as estimativas envolvendo recursos minerais. A Figura 13 a seguir ilustra como é realizado o procedimento de validação cruzada.

Figura 13 - Ilustração esquemática de como realizar a validação cruzada. A flecha está apontando para a amostra que será removida para ter seu valor estimado na figura a). Removendo-a sobram as outras amostras encontradas em b). Esta amostra que foi removida tem seu valor representado em c). A figura d) é responsável por mostrar a figura contendo todas as amostras e o valor real e estimado.



Fonte: extraído e modificado de Isaaks & Srivastava (1989).

3. ESTUDO DE CASO

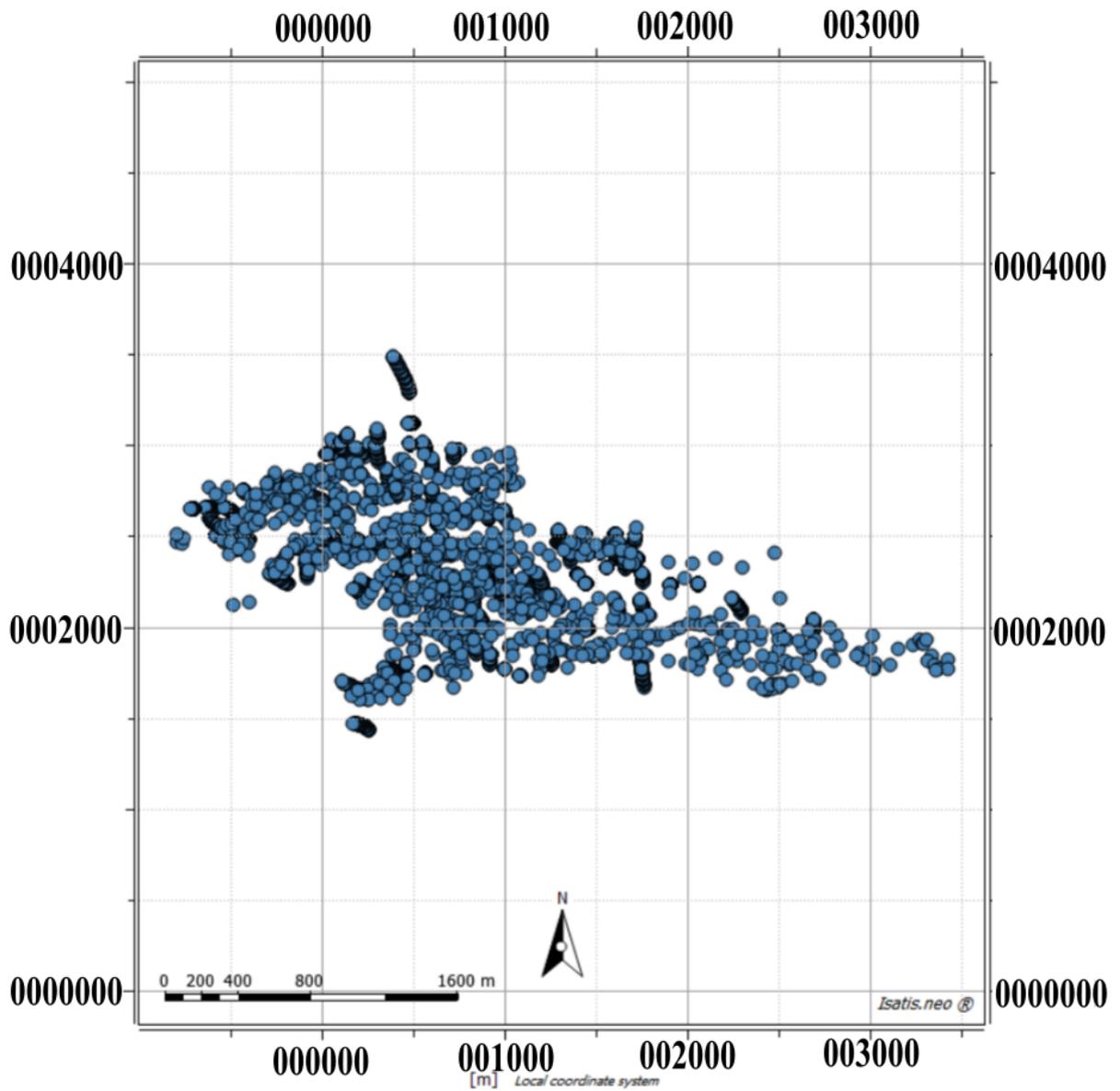
O seguinte capítulo é dedicado ao estudo de caso deste trabalho. Nele serão apresentadas informações relevantes acerca do banco de dados utilizado, através do sumário estatístico das variáveis para cada método de obtenção de densidade. Além de informações acerca do banco de dados será feita uma breve apresentação do contexto geológico da região em que a área de estudo está inserida (o Quadrilátero Ferrífero no estado de Minas Gerais), incluindo mapas elaborados para a região.

3.1 Banco de dados

O banco de dados fornecido que será utilizado, é de uma investigação de minérios da região do Quadrilátero Ferrífero no estado de Minas Gerais. Ele consiste de um projeto do *software* Isatis Classic que foi convertido para a versão Isatis.neo Mining Edition e conta com um total de 4017 amostras. No projeto já existe um modelo de blocos, que conta com 16005600 (dezesseis milhões cinco mil e seiscentos) blocos e com dimensão de 1000m³ (10m x 10m x 10m) cada bloco, além de informações como as litologias presentes no depósito, os teores de Fe das amostras e o valor de densidade para as amostras obtido por três métodos diferentes. Das 4017 amostras presentes no banco de dados, 1653 tiveram o valor de densidade obtido a partir do CNM, 2404 amostras tiveram seu valor de densidade a partir dos ensaios diretos de laboratório, além de 2930 amostras cujo valor de densidade obtido foi através da perfilagem geofísica gama-gama.

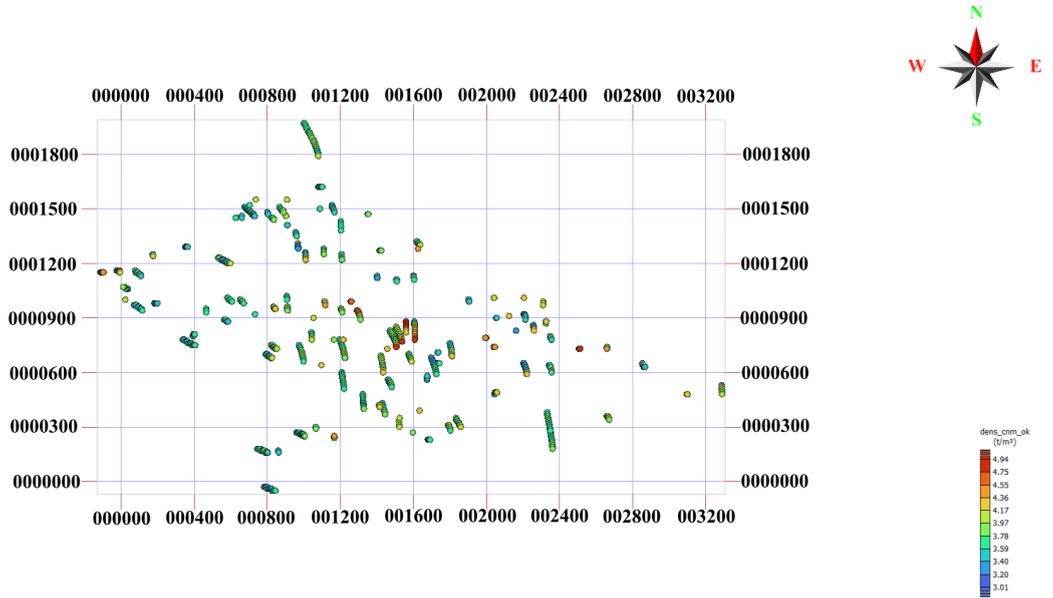
Para o desenvolvimento do trabalho os dados serão separados por litologia, sendo para cada litologia apresentados os valores de densidade obtido por cada um dos métodos. As estimativas produzidas também serão divididas por litologia, onde cada litologia apresentará três estimativas, sendo uma para cada método diferente de obtenção de densidade. As litologias escolhidas para o desenvolvimento do trabalho foram o itabirito compacto (IC), o itabirito friável (IF) e o itabirito friável rico (IFR). As Figuras 14, 15, 16 e 17 a seguir mostram todas as amostras presente no banco de dados, todas as amostras cujo valor de densidade foram obtidos a partir do CNM, todas as amostras cujo valor de densidade foi obtido através da perfilagem geofísica gama-gama e todas as amostras cujo valor da densidade foi obtido através dos ensaios diretos de laboratório, respectivamente.

Figura 14 - Mapa de localização das 4017 amostras presentes no banco de dados.



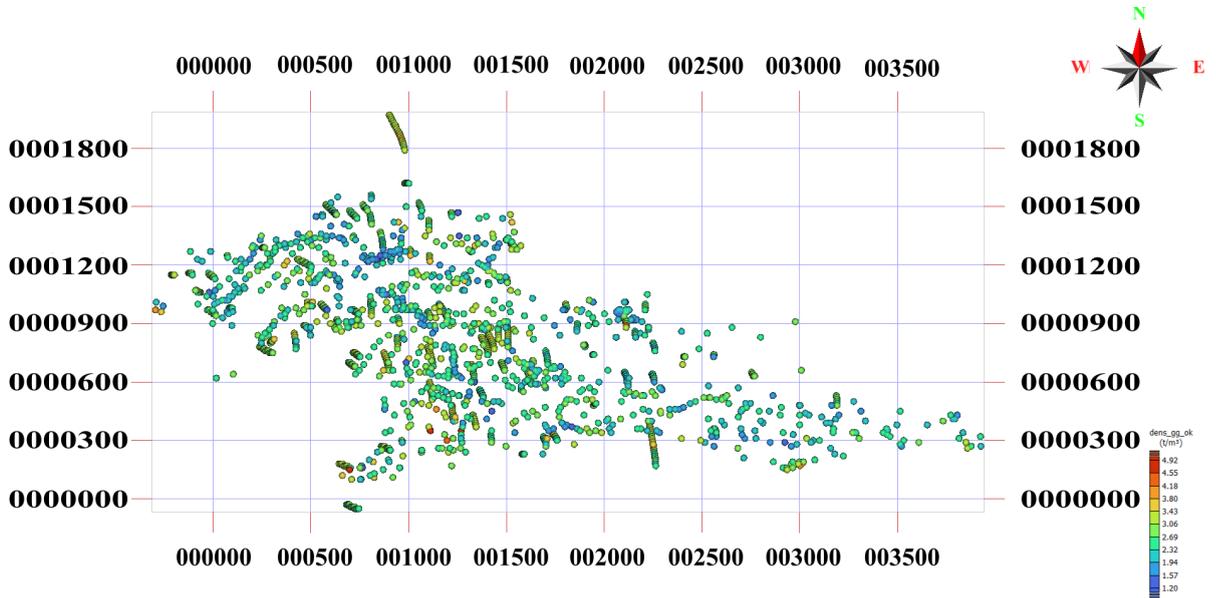
Fonte: elaborado pelo autor através do software *Isatis.neo*.

Figura 15 - Mapa de localização das 1653 amostras cujo valor de densidade foi obtido através do CNM.



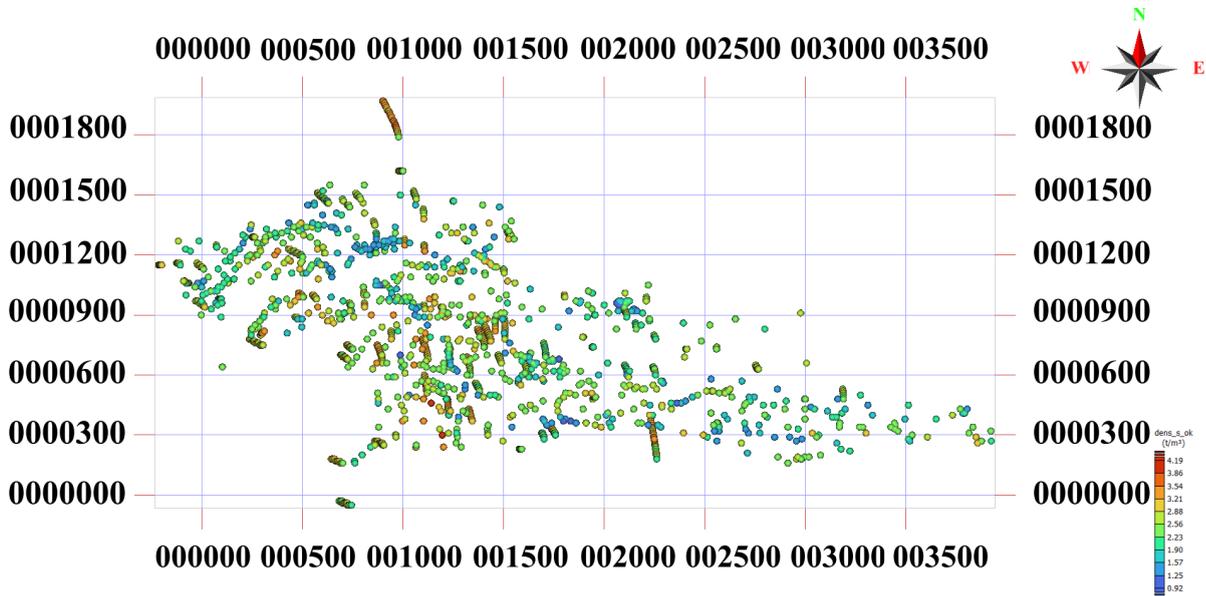
Fonte: elaborado pelo autor através do *software Isatis.neo*.

Figura 16 - Mapa de localização das 2930 amostras cujo valor da densidade foi obtido através da perfilagem geofísica gama-gama.



Fonte: elaborado pelo autor através do *software Isatis.neo*.

Figura 17 - Mapa de localização das 2404 amostras cujo valor da densidade foi obtido através dos ensaios diretos.



Fonte: elaborado pelo autor através do *software Isatis.neo*.

3.1.1 Itabirito Compacto - IC

No que diz respeito à litologia IC, podemos dizer que esta representa um total de 961 amostras do banco de dados, de um total de 4017 amostras, totalizando 23.92% dos dados. Apesar de 961 amostras serem classificadas como IC, nem todas elas tiveram um valor de densidade atribuído à elas, seja pelo método do CNM, da perfilagem geofísica gama-gama ou dos ensaios diretos de laboratório. Assim, foram atribuídos valores à 581 amostras, 670 amostras e 633 amostras respectivamente. A Tabela 3 a seguir apresenta os sumários estatísticos da variável densidade para a litologia IC para os três métodos de obtenção de densidade.

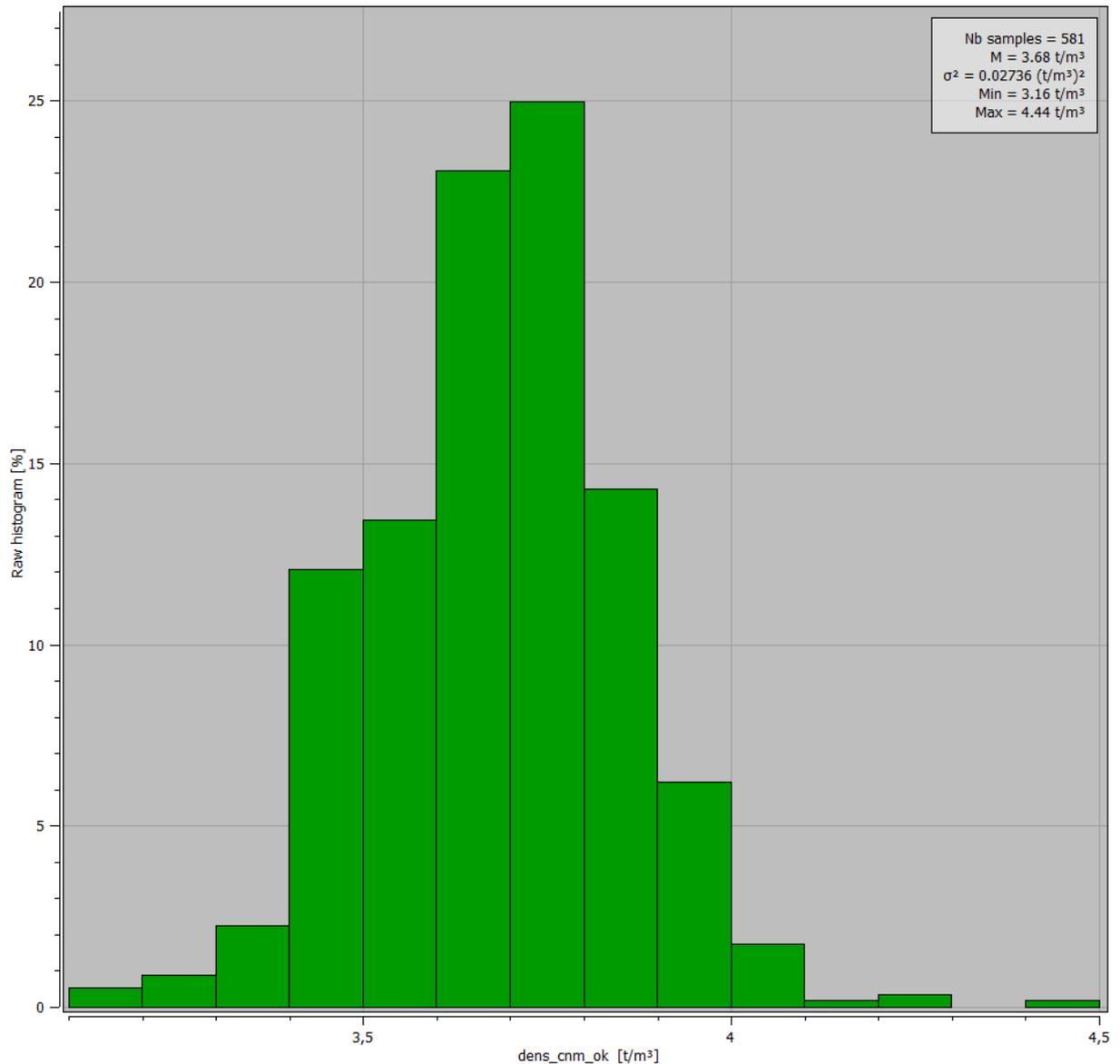
Tabela 3 - Sumário estatístico da variável densidade para os diferentes métodos de obtenção para a litologia IC.

Método	Contagem total	Contagem definida	Média	Variância	Desvio padrão	Mínimo	Máximo
CNM	961	581	3.68	0.02736	0.17	3.16	4.44
GG	961	670	3.02	0.09346	0.31	2.15	3.95
Ensaio diretos	961	633	3.00	0.09038	0.30	2.00	3.69

Fonte: autor.

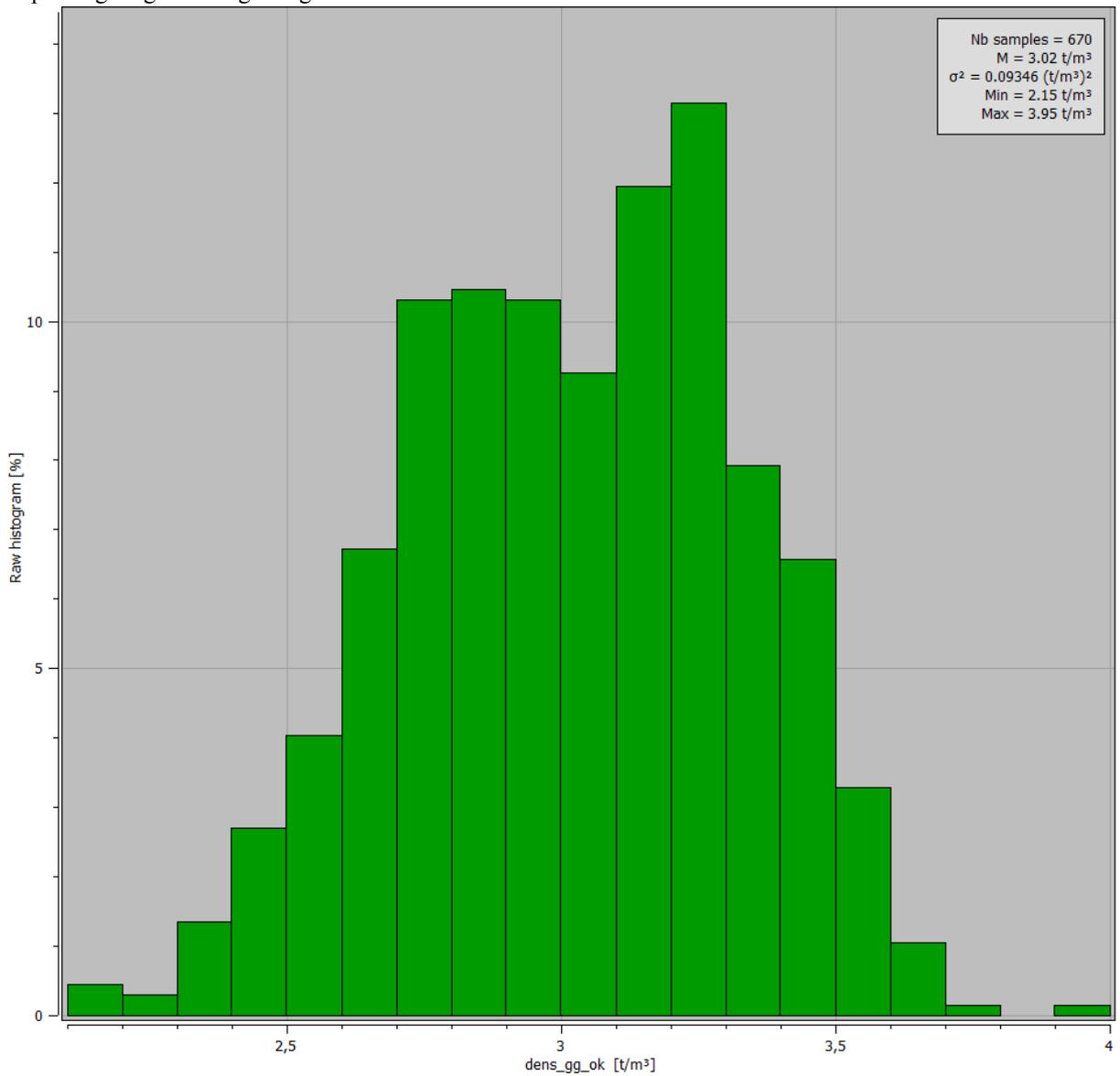
As figuras 18, 19 e 20 a seguir são os histogramas da variável densidade para a litologia IC para os métodos de obtenção de densidade através do CNM, da perfilagem geofísica gama-gama e dos ensaios diretos, respectivamente.

Figura 18 - Histograma da variável densidade para a litologia IC para o método de obtenção da densidade através do CNM.



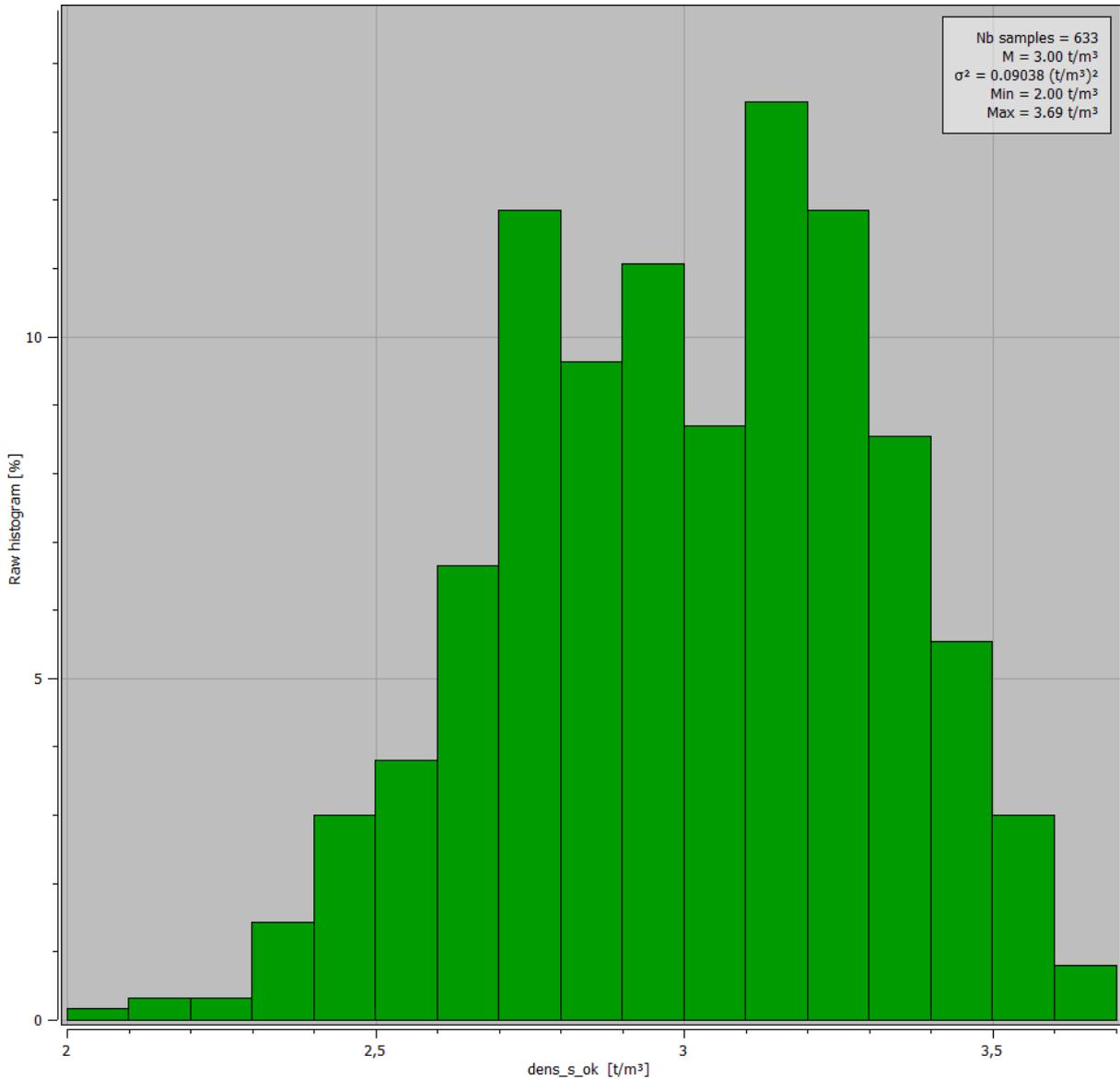
Fonte: elaborado pelo autor através do *software Isatis.neo*.

Figura 19 - Histograma da variável densidade para a litologia IC para o método de obtenção da densidade através da perfilagem geofísica gama-gama.



Fonte: elaborado pelo autor através do *software Isatis.neo*.

Figura 20 - Histograma da variável densidade para a litologia IC para o método de obtenção da densidade através dos ensaios diretos.



Fonte: elaborado pelo autor através do *software Isatis.neo*.

3.1.2 Itabirito Friável - IF

Quanto à litologia IF são encontradas 770 amostras, que representam cerca de 19.17% das amostras do banco de dados. Destas 770 amostras 438 apresentam valor de densidade relativo ao CNM, 602 amostras com valor de densidade obtido através da perfilagem geofísica gama-gama e 578 amostras com valor de densidade referente aos ensaios diretos de laboratório. A Tabela 4 a seguir apresenta o sumário estatístico da variável densidade para a litologia IF para os três métodos diferentes de obtenção de densidade.

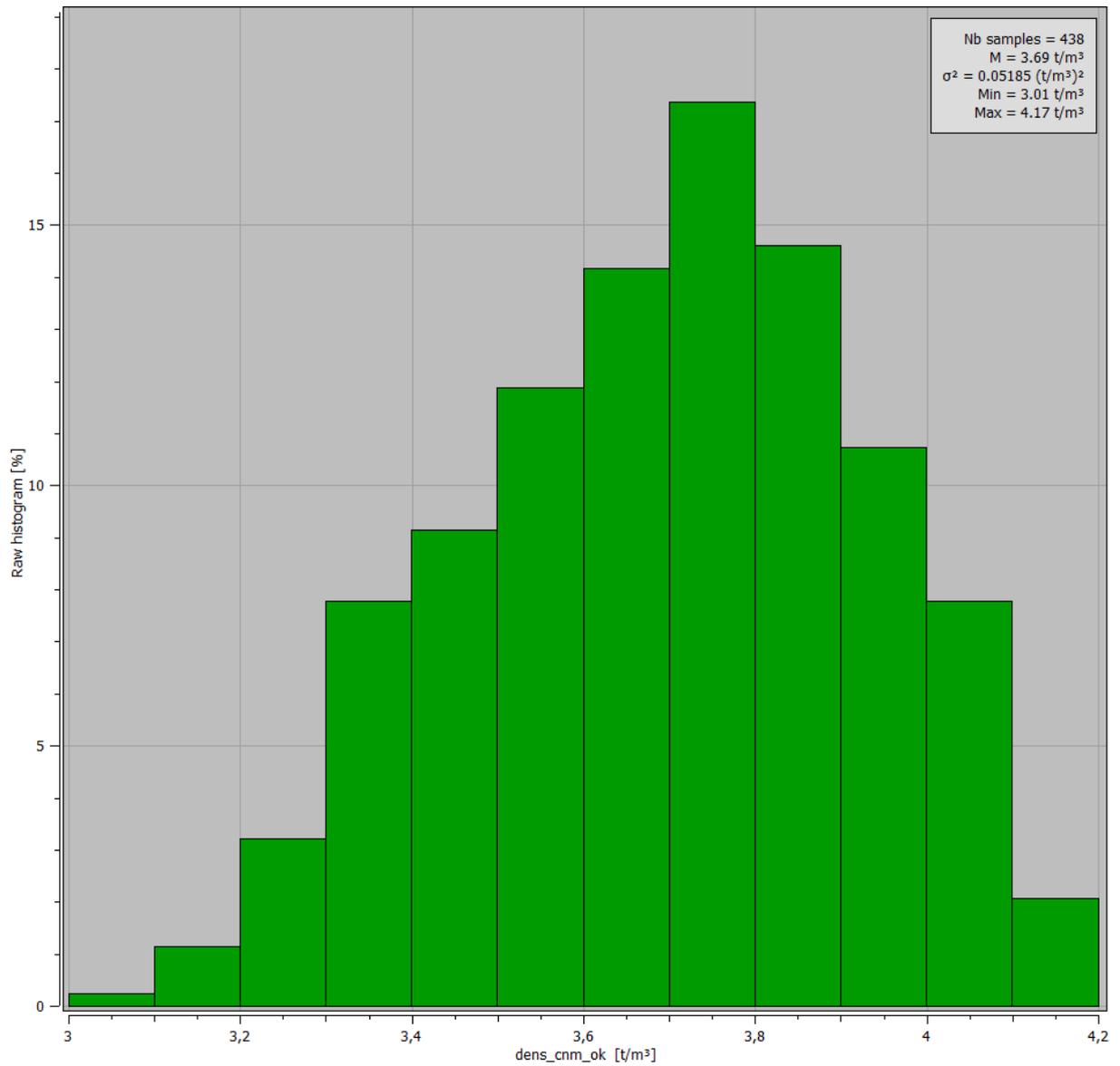
Tabela 4 - Sumário estatístico da variável densidade para os diferentes métodos de obtenção para a litologia IF.

Método	Contagem total	Contagem definida	Média	Variância	Desvio padrão	Mínimo	Máximo
CNM	770	438	3.69	0.05185	0.23	3.01	4.17
GG	770	602	2.66	0.1012	0.32	1.71	3.59
Ensaio direto	770	578	2.54	0.09579	0.31	1.68	3.48

Fonte: autor.

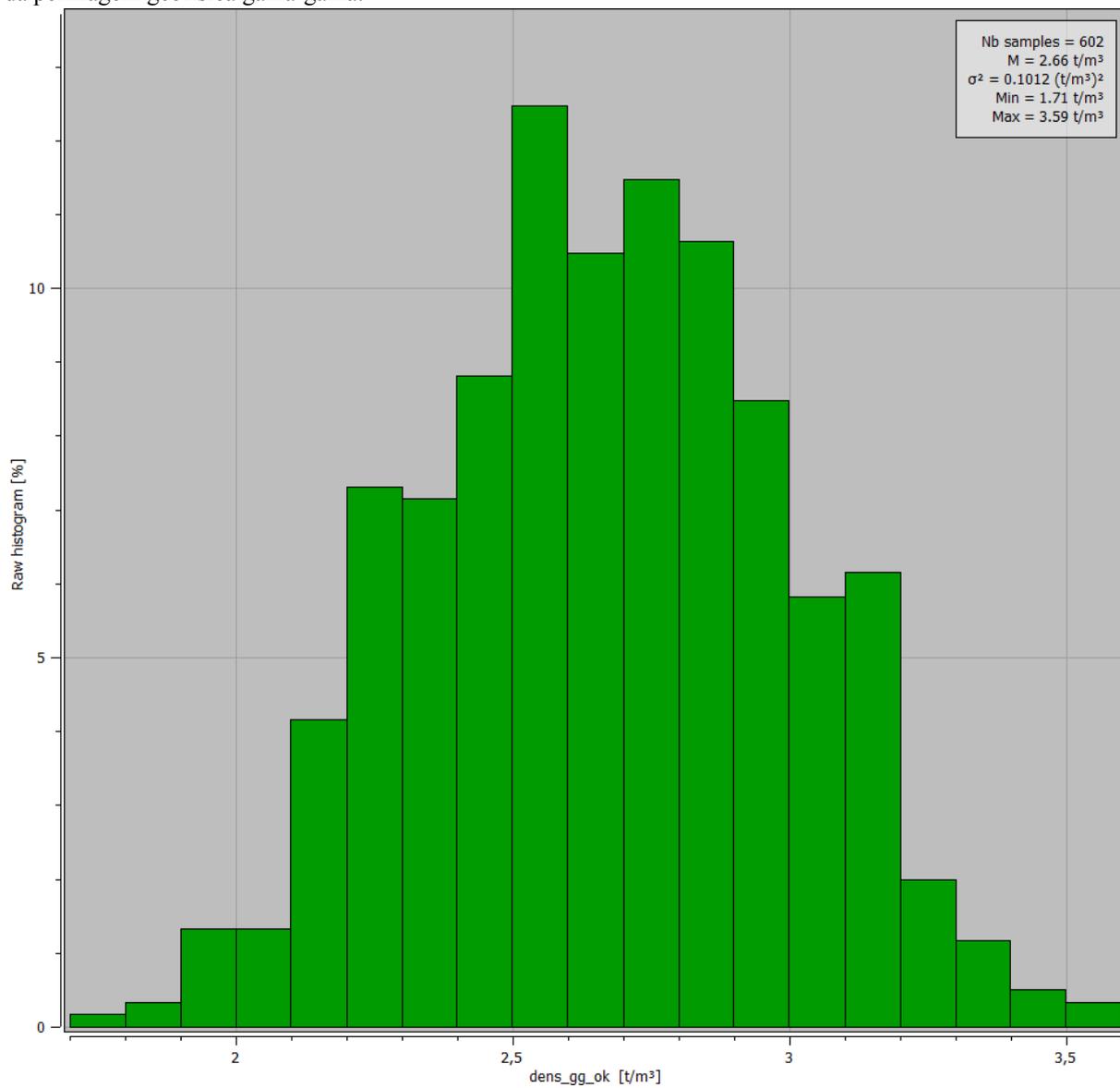
As figuras 21, 22 e 23 a seguir são os histogramas da variável densidade para a litologia IF para os métodos de obtenção de densidade através do CNM, da perfilagem geofísica gama-gama e dos ensaios diretos , respectivamente.

Figura 21 - Histograma da variável densidade para a litologia IF para o método de obtenção da densidade através do CNM.



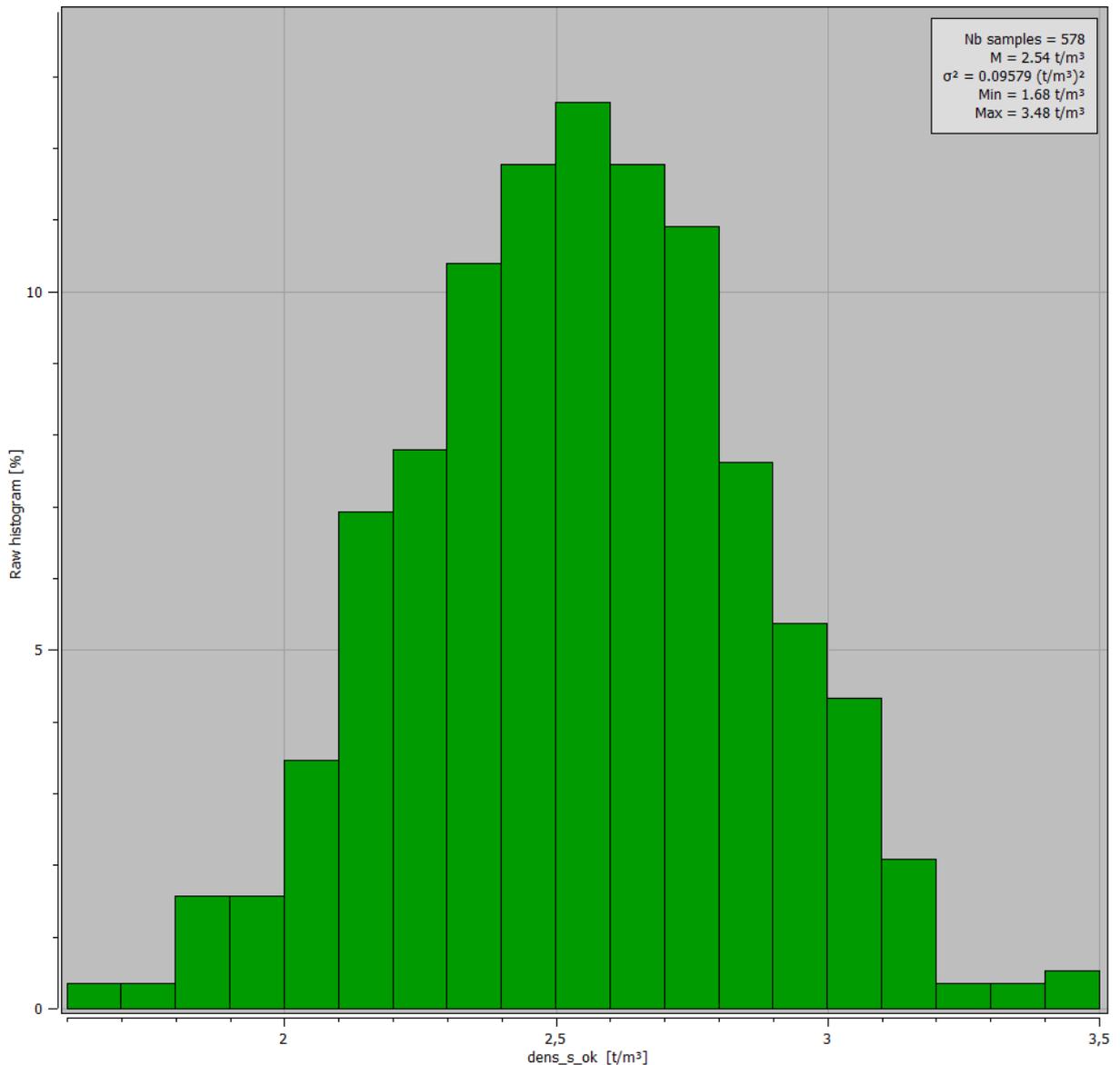
Fonte: elaborado pelo autor através do *software Isatis.neo*.

Figura 22 - Histograma da variável densidade para a litologia IF para o método de obtenção da densidade através da perfilagem geofísica gama-gama.



Fonte: elaborado pelo autor através do *software Isatis.neo*.

Figura 23 - Histograma da variável densidade para a litologia IF para o método de obtenção da densidade através dos ensaios diretos de laboratório.



Fonte: elaborado pelo autor através do *software Isatis.neo*.

3.1.3 Itabirito Friável Rico - IFR

A terceira litologia é o IFR, que contém 252 amostras e representa cerca de 6.27% das amostras do banco de dados. Destas 252 amostras, 91 têm o valor de densidade relativos ao CNM, 209 amostras cuja densidade foi obtida através da perfilagem geofísica gama-gama e 204 amostras cuja densidade foi resultado dos ensaios diretos de laboratório. A Tabela 5 a seguir apresenta o sumário estatístico da variável densidade para a litologia IFR.

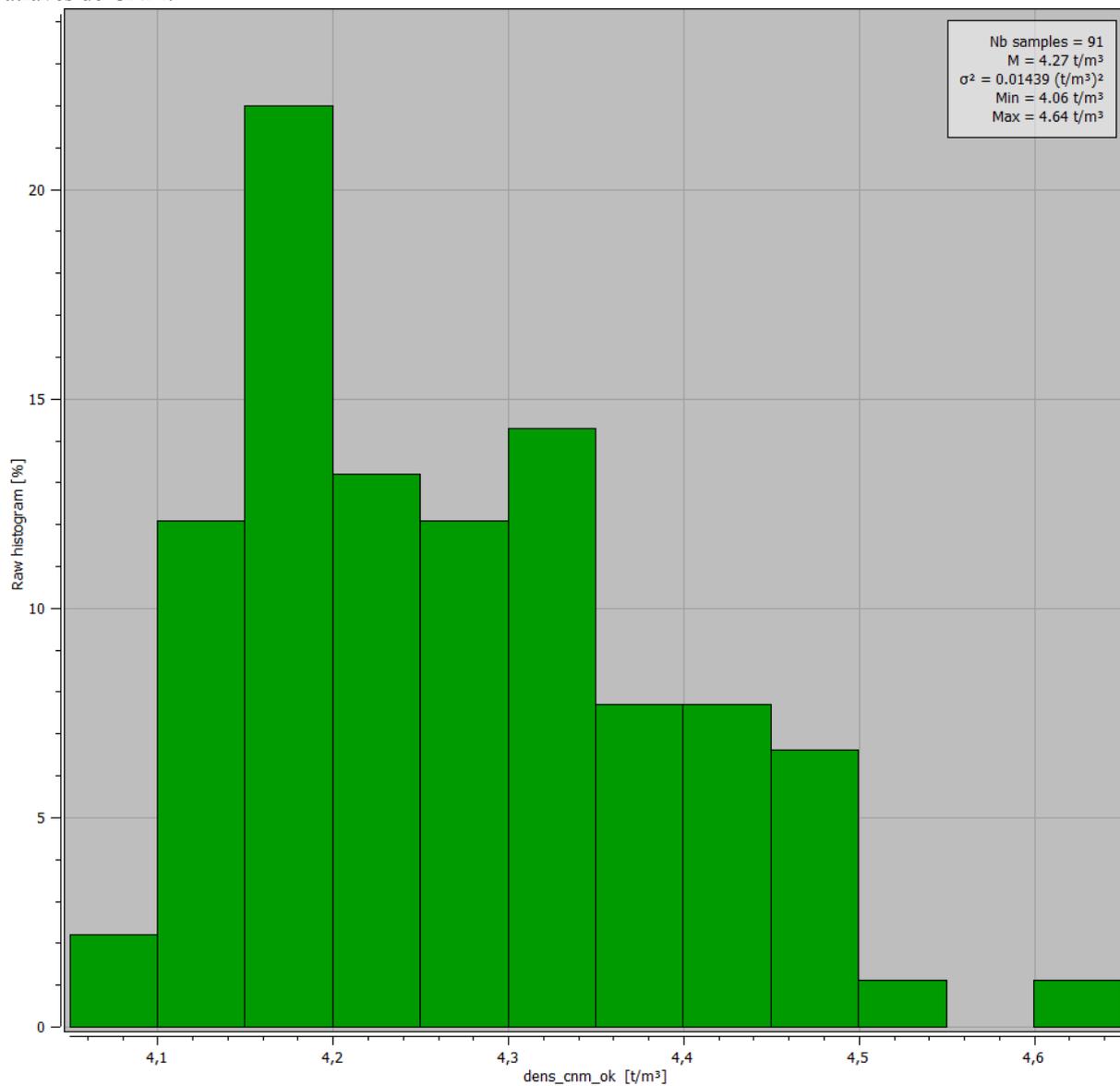
Tabela 5 - Sumário estatístico da variável densidade para os diferentes métodos de obtenção para a litologia IC.

Método	Contagem total	Contagem definida	Média	Variância	Desvio padrão	Mínimo	Máximo
CNM	252	91	4.27	0.01439	0.12	4.06	4.64
GG	252	209	2.71	0.1046	0.32	2.02	3.56
Ensaio direto	252	204	2.60	0.09897	0.31	1.77	3.40

Fonte: autor.

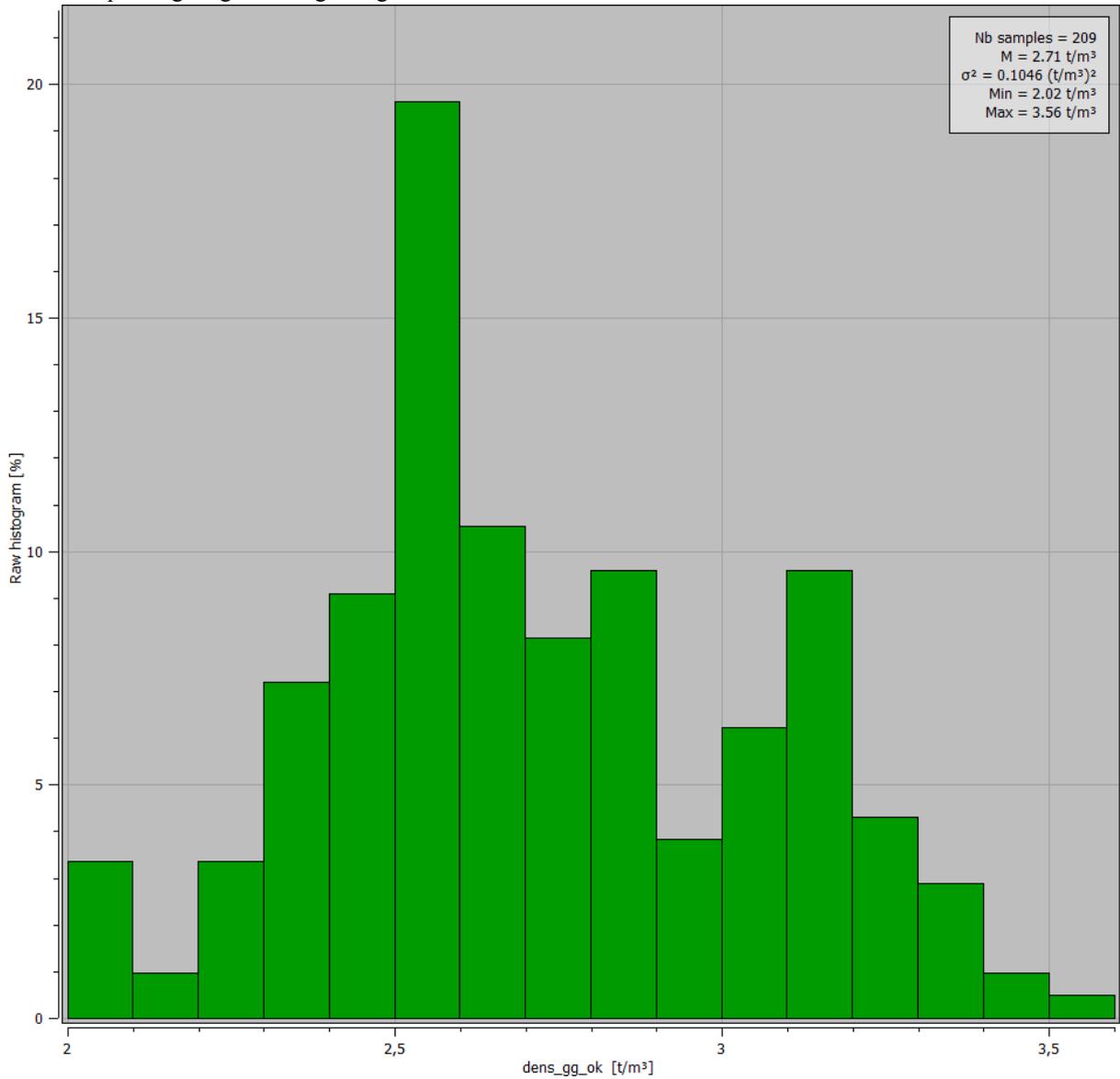
As figuras 24, 25 e 26 a seguir são os histogramas da variável densidade para a litologia IFR para os métodos de obtenção de densidade através do CNM, da perfilagem geofísica gama-gama e dos ensaios diretos, respectivamente.

Figura 24 - Histograma da variável densidade para a litologia IFR para o método de obtenção da densidade através do CNM.



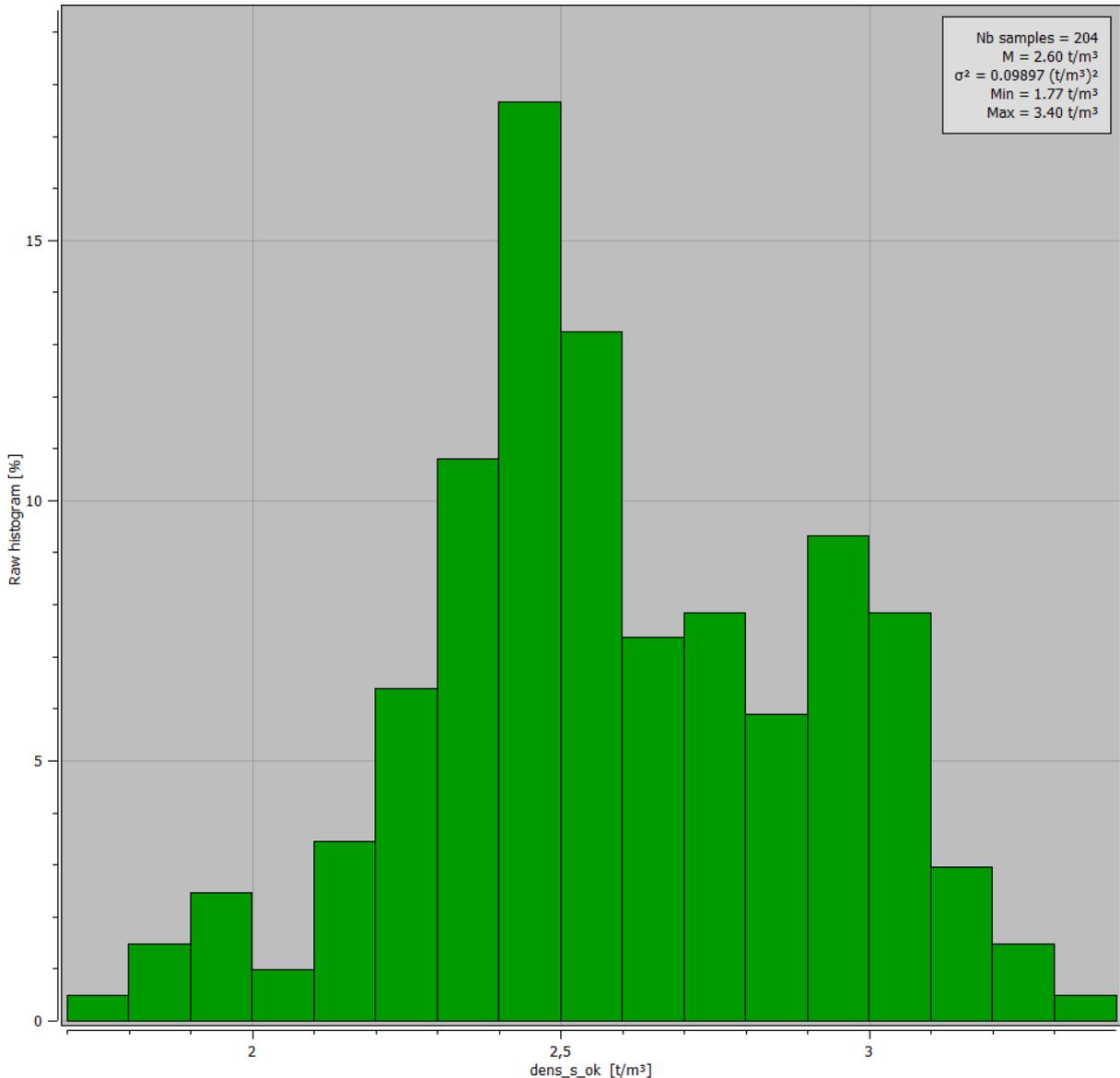
Fonte: elaborado pelo autor através do *software Isatis.neo*.

Figura 25 - Histograma da variável densidade para a litologia IFR para o método de obtenção da densidade através da perfilagem geofísica gama-gama.



Fonte: elaborado pelo autor através do *software Isatis.neo*.

Figura 26 - Histograma da variável densidade para a litologia IFR para o método de obtenção da densidade através dos ensaios diretos de laboratório.



Fonte: elaborado pelo autor através do *software Isatis.neo*.

Com base nos sumários estatísticos apresentados podemos afirmar que o método do CNM contém um número significativamente menor de amostras que os outros dois métodos. Além do número menor de amostras, o CNM apresenta menor amplitude nos valores de densidade, isto é, o intervalo entre os valores de mínimo e máximo é menor em comparação com os outros métodos.

Esta diferença nos valores de densidade das amostras pode estar associado ao fato de tanto o método do CNM, quanto o método de densidade média dependerem de ensaios de laboratório para a obtenção da densidade, que implica em haver material recuperado no

processo de amostragem (neste caso, os materiais oriundos dos testemunhos de sondagem). A perfilagem geofísica, por sua vez, não necessita de recuperação de material para obtenção da densidade, ela apenas é aplicada em um furo de sondagem existente, o que justifica ter sido a base de dados com o maior número de amostras.

3.2 Contexto geológico do Quadrilátero Ferrífero

O Quadrilátero Ferrífero é uma região do estado de Minas Gerais que abrange um total de 34 municípios (dentre eles estão Belo Horizonte, Ouro Preto, Ouro Branco, Mariana, Brumadinho, entre outros), se situa na porção centro-sudeste do estado e têm uma área aproximada de 7000 m² (CASTRO, JÚNIOR & LIMA, 2011). A Província Mineral Ferro-Aurífera do Quadrilátero Ferrífero é uma das principais províncias metalogenéticas do Brasil e o estado de Minas Gerais um dos principais distritos mineiros do país, totalizando ao lado dos estados Pará, Goiás e Bahia 80% de toda a produção de *commodities* em valor (MELFI, MISI, CAMPOS & CORDANI, 2016). O Quadrilátero Ferrífero é hospedeiro de uma das maiores mineralizações de ferro de alto teor do mundo (CASTRO, ENDO & GANDINI, 2020). A Figura 27 a seguir apresenta um mapa de localização da região denominada de Quadrilátero Ferrífero.

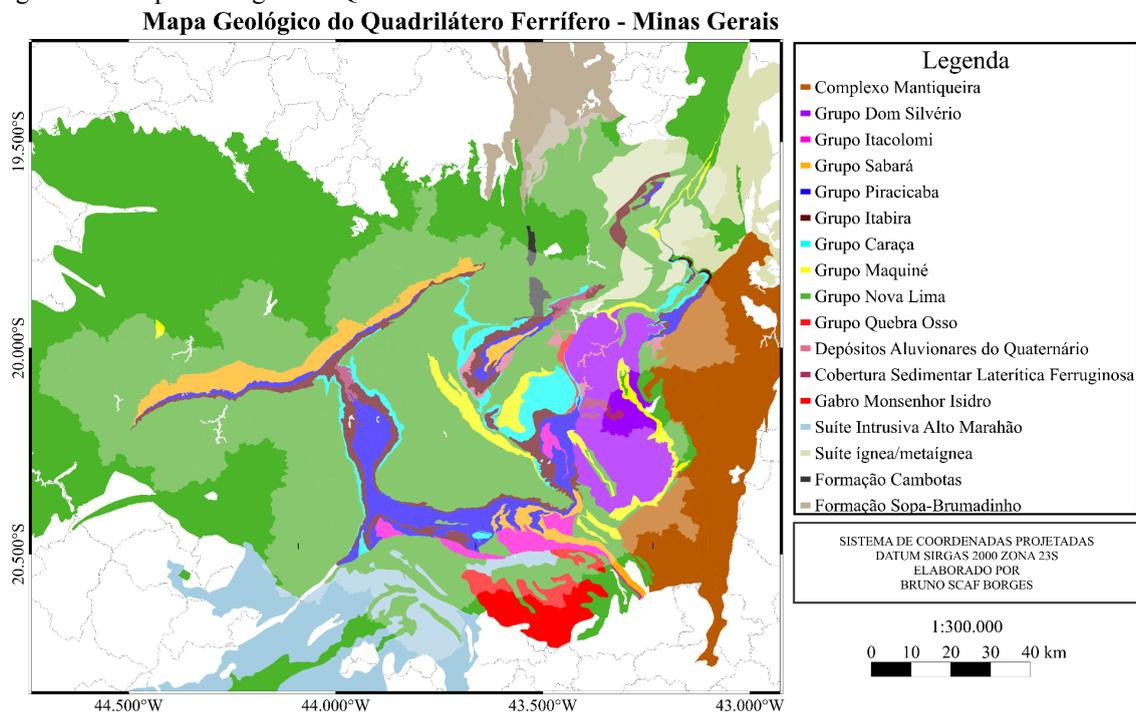
processos hidrotermais e metamórficos (CASTRO, JÚNIOR & LIMA, 2011; CASTRO, ENDO & GANDINI, 2020).

Ruchkys *et al.* (2013) apontam que as rochas de maior significância do ponto de vista do minério de ferro, são os itabiritos, os dolomitos (ricos em Fe) e os metapelitos (sendo divididos entre ricos em hematita e ricos em pirita), todos pertencentes ao Grupo Itabira. Estas rochas, têm como característica serem formações ferríferas metamórficas, com forte oxidação (cuja origem acredita-se ser resultado de eventos supergênicos ou hidrotermais), cujos corpos de minério são descontínuos e característicos por possuírem alto teor de Fe (maiores que 64% de Fe), e se apresentarem de maneira lenticular com dimensões variadas, desde decímetros, até a centenas de metros (MELFI, MISI, CAMPOS & CORDANI, 2016).

Em termos estratigráficos, o Quadrilátero Ferrífero pode ser dividido em três unidades estratigráficas principais separadas por discordâncias angulares e erosivas (DORR, 1969). A primeira delas é o Supergrupo Rio das Velhas, que é composto pelos Grupos Nova Lima e Maquiné, que são caracterizados por rochas metamórficas como filitos, quartzitos, xistos, metacherts, metagrauvas entre outros.

A segunda unidade consiste no Supergrupo Minas, que é composto dos Grupos Caraça, Itabira, Piracicaba e Sabará (DORR, 1969; CASTRO, ENDO & GANDINI, 2020). Este Supergrupo é caracterizado principalmente por itabiritos, filitos, xistos, dolomitos e quartzitos. A terceira unidade é o Grupo Itacolomi, caracterizado principalmente por filitos, quartzitos e conglomerados (DORR, 1969; ALMEIDA, 1977). A Figura 28 a seguir apresenta um mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero.

Figura 28 - Mapa Geológico do Quadrilátero Ferrífero - MG.



Fonte: dados do IBGE 2018 e elaborado pelo autor.

No que diz respeito a mineralogia das rochas, a hematita é o principal óxido que ocorre nos depósitos ferríferos da região, e ao contrário dos modelos de depósitos ferríferos que são encontrados ao redor do mundo, a mineralogia do Quadrilátero Ferrífero é pouco variável, sendo constituída principalmente de hematita, magnetita ou goethita (MELFI, MISI, CAMPOS & CORDANI, 2016).

A hematita, é o óxido de ferro mais comum, sendo esta presente em três diferentes formas (martita, hematita granoblástica e especularita), e estas formas estão diretamente associadas ao grau metamórfico e deformacional que as rochas foram submetidas. Já a magnetita ocorre em agregados ou como cristais de kenomagnetita, em alguns casos, estes são cristais reliquiares contidos nos cristais de hematita (MELFI, MISI, CAMPOS & CORDANI, 2016). Os minerais que constituem a ganga são: quartzo, dolomita e minerais do grupo dos anfíbios (actinolita, tremolita, grunerita, cummingtonita e antofilita); e estes minerais são responsáveis pela classificação composicional dos itabiritos, sendo divididos em: quartzo-itabirito, itabirito dolomítico e itabirito anfíbolítico. Além dos minerais citados, fazem parte da mineralogia das rochas, como minerais acessórios alguns filossilicatos (sericita, clorita, muscovita, cianita, biotita, talco, fuchsite, flogopita e pirofilita), granada, estauroлита, apatita, titanita e caolinita (GONÇALVES, 2020).

Os quartzo-itabirito são caracterizados por alternância de jaspe e hematita (formando os chamados jaspilitos), que formam bandas claras (jaspe) e escuras (ferrosas), sendo esta composição o resultado da diagênese que a rocha sofreu e posteriormente um metamorfismo. O quartzo ocorre como cristais, mas também como veios, sendo os cristais resultado da recristalização dos cherts que estavam presentes nos jaspilitos (ocorrido durante o metamorfismo). Tal litologia apresenta deformações dúcteis (dobras) comumente associadas a ela.

Os itabiritos dolomíticos também apresentam textura delimitada por bandas, sendo estas bandas compostas predominantemente por: dolomita rica em ferro, quartzo e óxidos de ferro. Além disso, em menor proporção, podem apresentar minerais como a calcita, clorita e anfibólios. Constituem, portanto, dolomitos ferruginosos, com alteração de bandas carbonáticas (claras) e ferrosas (escuras). De maneira geral, os itabiritos dolomíticos têm a sua estrutura maciça, sem a presença de foliação ou de dobras.

Os itabiritos anfibolíticos apresentam sempre minerais do grupo do anfibólio (que estão associados ao metamorfismo) misturados com os minerais ferrosos e com o quartzo, e esta assembleia mineralógica se apresenta na intercalação de bandas escuras (compostas de anfibólio e ferro) e claras (quartzo com anfibólio disseminado), podendo frequentemente apresentar foliação metamórfica do tipo xistosidade, além de deformações dúcteis (dobras).

4. DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

Neste capítulo é apresentado o desenvolvimento do trabalho a partir da metodologia proposta anteriormente, onde após a etapa de EDA (cujos sumários estatísticos foram apresentados no Capítulo anterior), foi verificada a existência ou não de agrupamento das amostras através do método das células móveis; após a análise do agrupamento ou não de amostras foi realizada a análise estrutural dos dados (variografia); com o fenômeno espacial e direções de maior e menor continuidade definidos, foram realizadas as estimativas de densidade para cada método e para cada litologia e, posteriormente, feitas as validações destas estimativas com a técnica de validação cruzada.

4.1 Desagrupamento de amostras

O agrupamento de amostras, como foi dito anteriormente, acaba impactando alguns valores do sumário estatístico. Além do mais, caso haja agrupamento de amostras e o mesmo seja ignorado, pode acarretar em erros na estimativa. Desta forma, para verificar se há ou não agrupamento de dados no banco de dados utilizado, foi realizada uma comparação entre a média dos dados sem tratamento algum e a média dos dados após o desagrupamento pelo método das células móveis. Os testes de desagrupamento foram realizados para cada um dos métodos e para cada litologia presente no trabalho, com parâmetros idênticos para cada método e/ou litologia, como apresentado na Tabela 6 a seguir.

Tabela 6 - Parâmetros utilizados nos testes de desagrupamento de amostras pelo método das células móveis.

	X	Y	Z
Tamanho mínimo (m)	10	10	1
Tamanho máximo (m)	5000	5000	500
Número de testes	100	100	100

Fonte: autor.

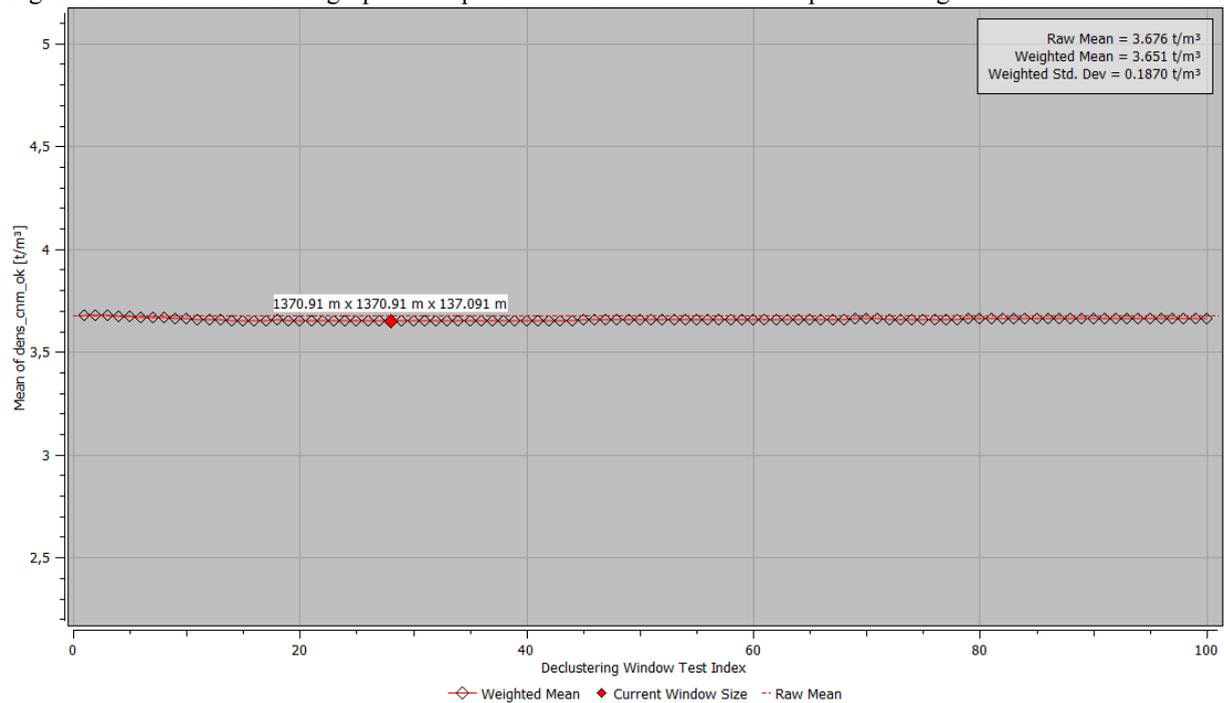
IC

Após aplicadas as técnicas de desagrupamento pelo método das células móveis, foi verificado que não havia um impacto significativo entre a média agrupada e a média desagrupada das amostras. Sendo assim foi escolhido utilizar as amostras sem a utilização dos pesos de desagrupamento para as etapas seguintes do trabalho. As Figuras 29, 30 e 31 a seguir mostram a média agrupada e desagrupada para cada teste realizado. A amostra em vermelho é

aquela cujo valor da média é mais discrepante em relação à média sem desagrupamento dos dados. Podemos observar que os valores encontrados são próximos, sendo alguns centésimos de diferença entre eles.

CNM

Figura 29 - Resultado do desagrupamento pelo método das células móveis para a litologia IC e método CNM.

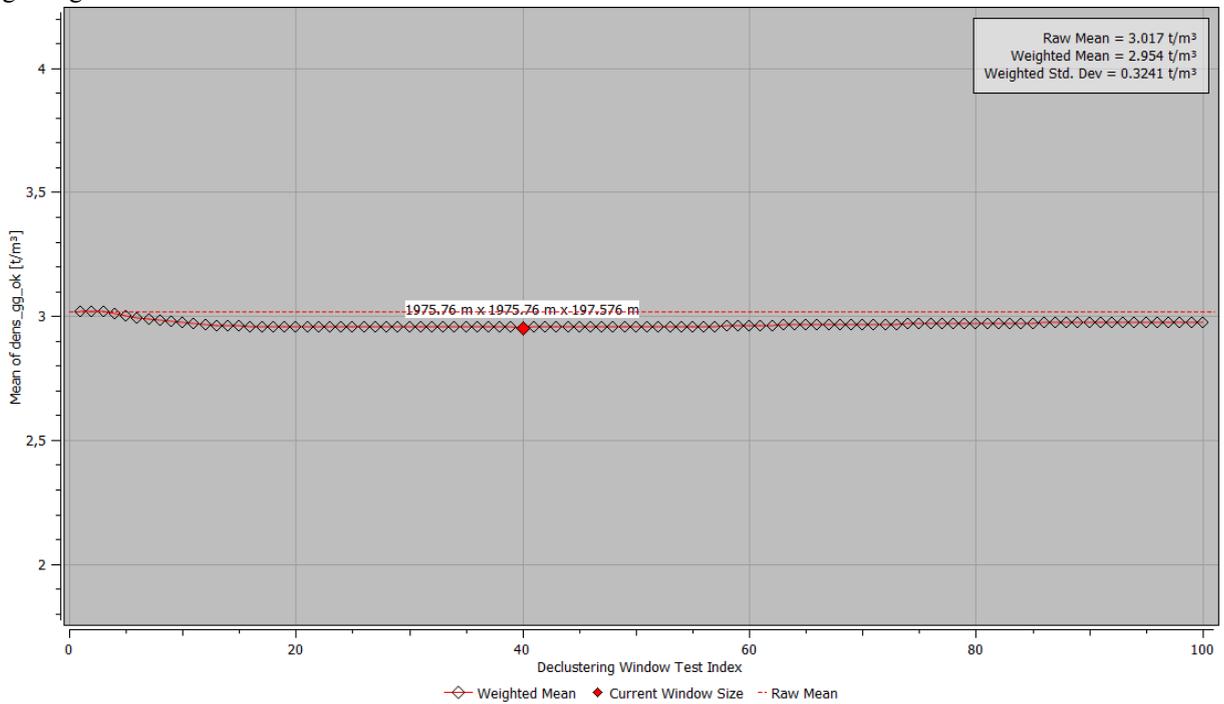


Fonte: elaborado pelo autor no *software Isatis.neo*.

Como podemos observar, para o CNM a diferença entre a média agrupada e a média desagrupada foi de 0.025, uma vez que a média agrupada foi 3.676 e a média desagrupada foi 3.651.

Gama-gama

Figura 30 - Resultado do desagrupamento pelo método das células móveis para a litologia IC e método gama-gama.

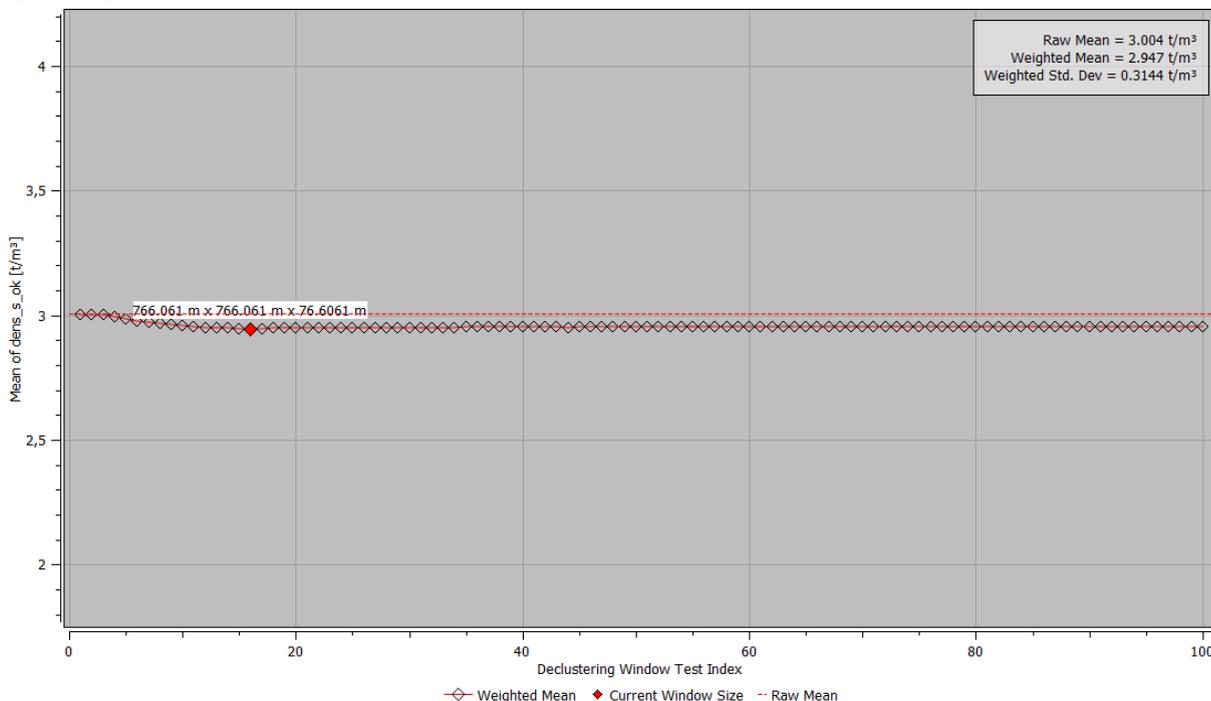


Fonte: elaborado pelo autor no *software Isatis.neo*.

Como podemos observar a média agrupada foi 3.017 e a desagrupada foi 2.954, sendo uma diferença de 0.063.

Ensaio direto

Figura 31 - Resultado do desagrupamento pelo método das células móveis para a litologia IC e método dos ensaios diretos.



Fonte: elaborado pelo autor no *software Isatis.neo*.

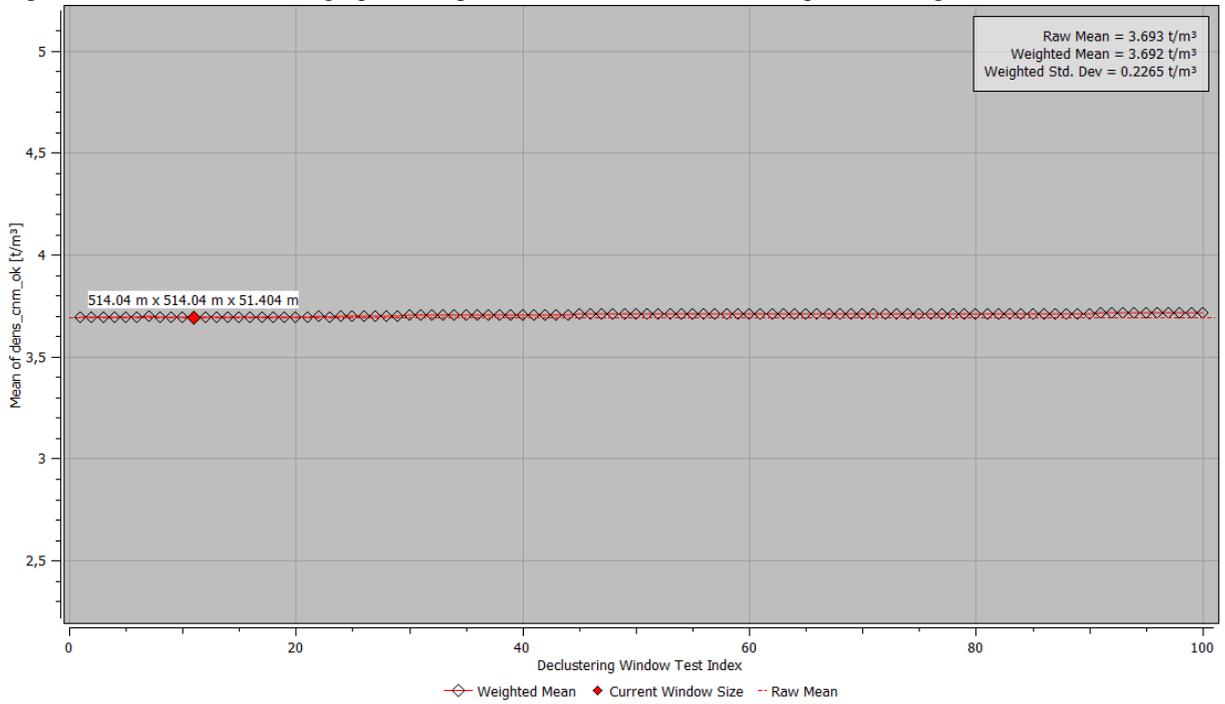
Como podemos observar na imagem acima, a média agrupada foi de 3.004 e a desagrupada foi de 2.947, resultando numa diferença de 0.057.

IF

Para a litologia IF também foi verificado que não havia uma diferença significativa dos valores entre a média agrupada e a média desagrupada dos dados. Assim, não foi necessária a utilização de pesos de desagrupamentos para as amostras de IF para nenhum dos métodos de obtenção da densidade. As Figuras 32, 33 e 34 apresentam o resultado do desagrupamento das amostras.

CNM

Figura 32 - Resultado do desagrupamento pelo método das células móveis para a litologia IF e método CNM.

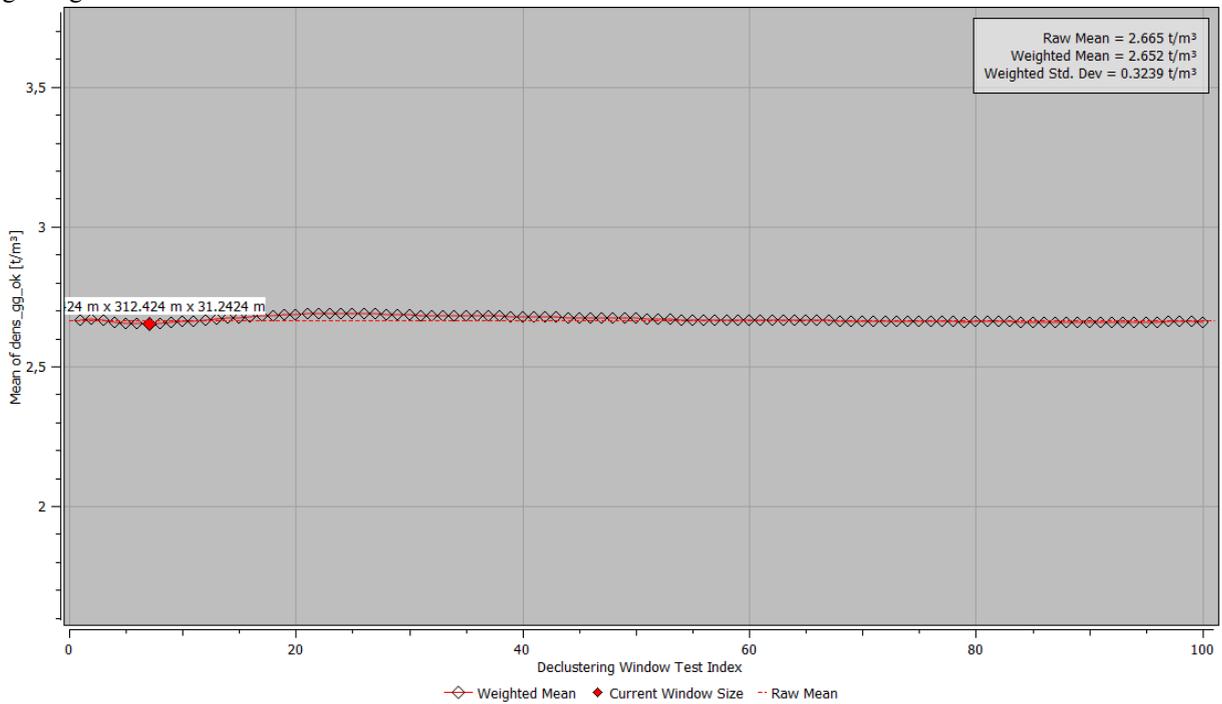


Fonte: elaborado pelo autor no *software Isatis.neo*.

Como podemos observar na imagem acima, a média agrupada e desagrupada é praticamente a mesma, sendo a agrupada 3.693 e a desagrupada 3.692, sendo a diferença apenas 0.001.

Gama-gama

Figura 33 - Resultado do desagrupamento pelo método das células móveis para a litologia IF e método gama-gama.

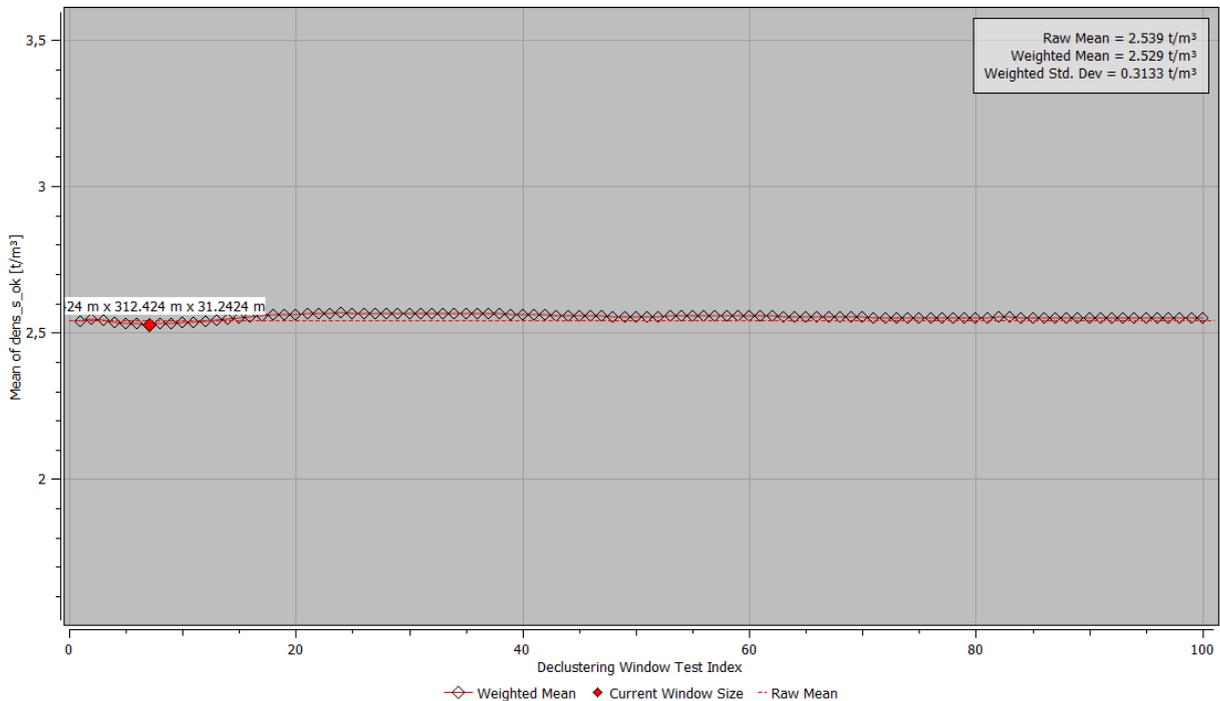


Fonte: elaborado pelo autor no *software Isatis.neo*.

Como podemos observar, a média agrupada e desagrupada ficaram novamente muito próximas. A média agrupada foi 2.665 e a média desagrupada foi 2.652, sendo a diferença muito pequena de 0.003.

Ensaaios diretos

Figura 34 - Resultado do desagrupamento pelo método das células móveis para a litologia IF e método dos ensaios diretos.



Fonte: elaborado pelo autor no *software Isatis.neo*.

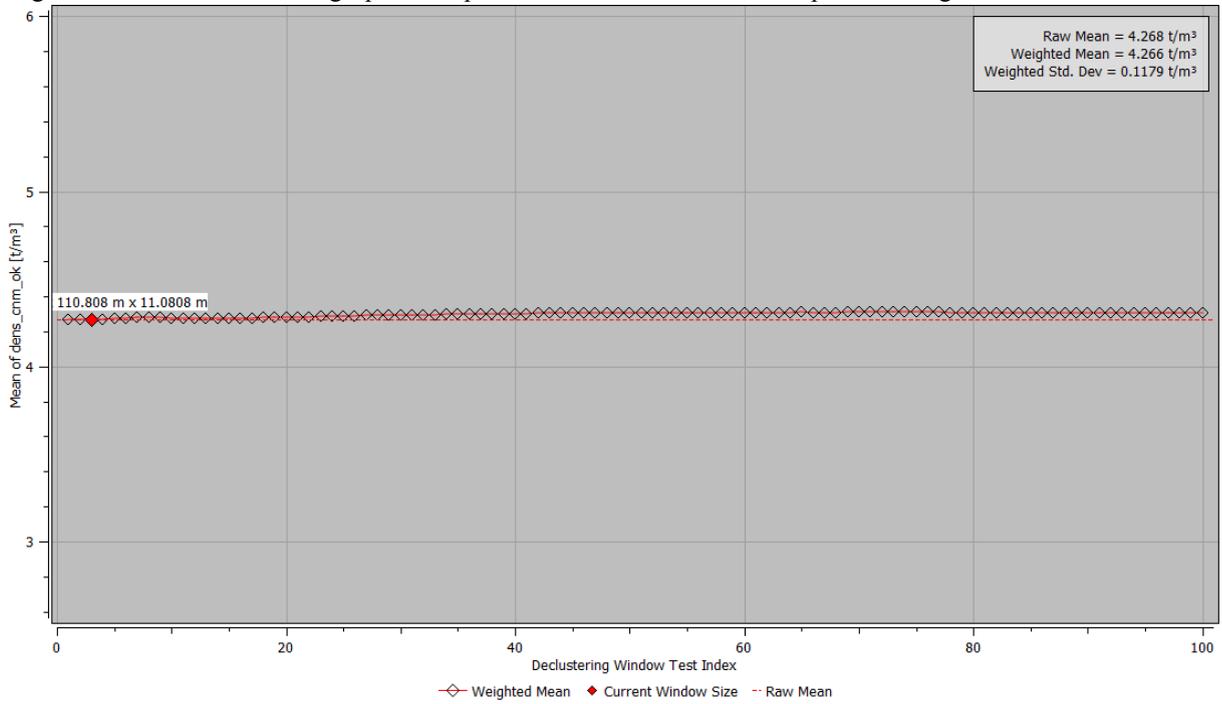
A partir da imagem é possível observar que a média agrupada e desagrupada não são muito diferentes, sendo a agrupada 2.539 e a desagrupada 2.529, uma diferença de apenas 0.010.

IFR

Para a litologia IFR também não foi necessário a utilização dos pesos de desagrupamento para as amostras, isso porque a diferença entre a média agrupada e desagrupada foi muito pequena. As Figuras 35, 36 e 37 a seguir mostram o resultado do desagrupamento realizado no *software*.

CNM

Figura 35 - Resultado do desagrupamento pelo método das células móveis para a litologia IFR e método CNM.

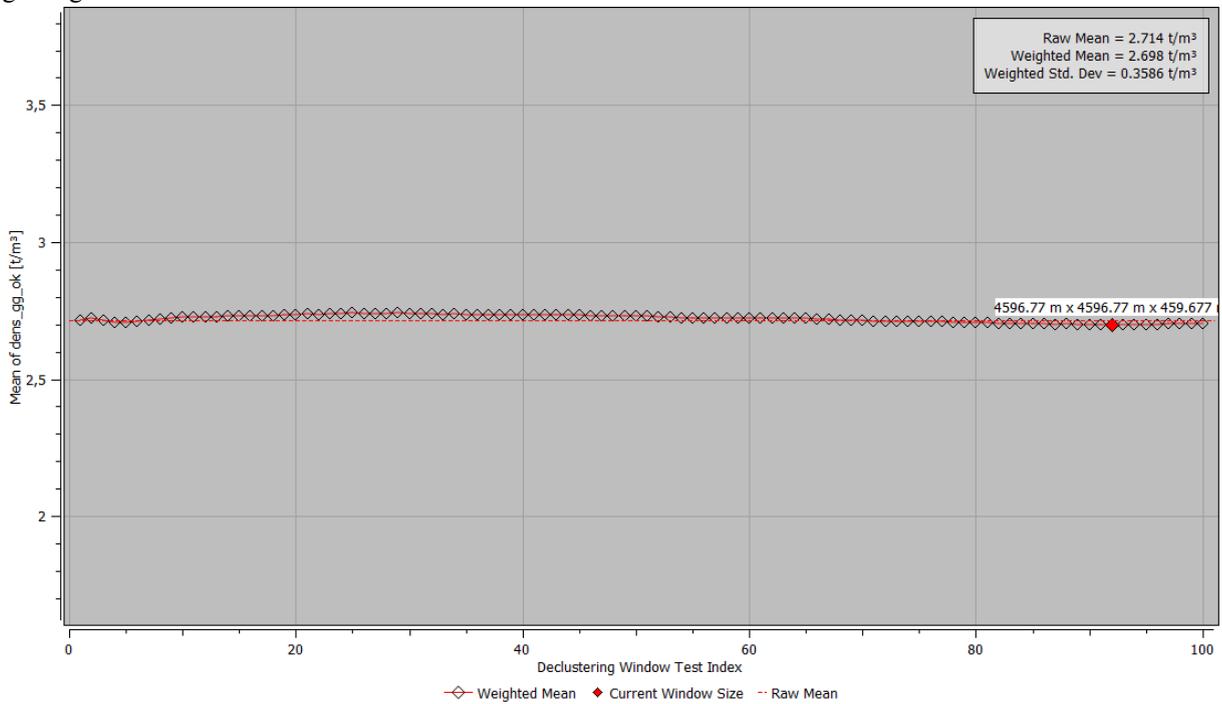


Fonte: elaborado pelo autor no *software Isatis.neo*.

A imagem acima mostra que não há uma diferença significativa entre a média dos dados agrupados e desagrupados, isto porque a média agrupada foi 4.268 e a média desagrupada foi 4.266, logo a diferença entre ambas foi de apenas 0.002.

Gama-gama

Figura 36 - Resultado do desagrupamento pelo método das células móveis para a litologia IFR e método gama-gama.

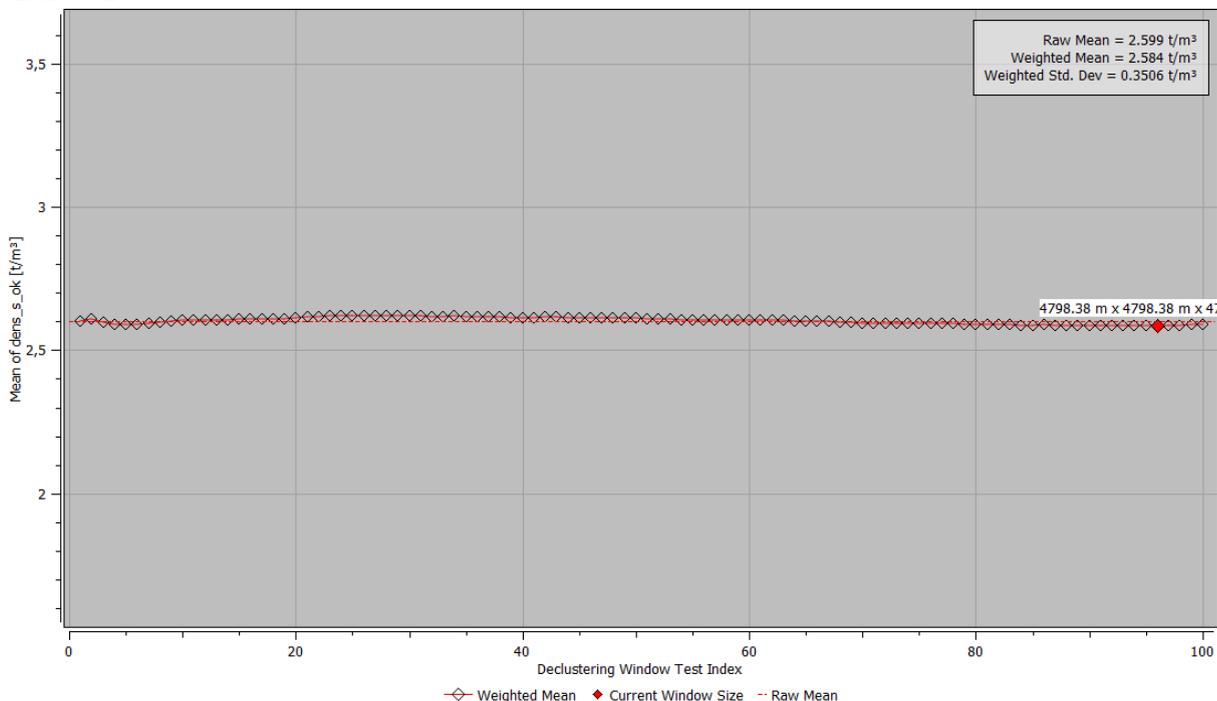


Fonte: elaborado pelo autor no *software Isatis.neo*.

A imagem nos revela que apesar de existir uma diferença entre as médias a mesma não é significativa. Isto porque a média dos dados agrupados foi 2.714 e a média dos dados desagrupados foi 2.698, uma diferença pequena de 0.016.

Ensaaios diretos

Figura 37 - Resultado do desagrupamento pelo método das células móveis para a litologia IFR e método dos ensaios diretos.



Fonte: elaborado pelo autor no *software Isatis.neo*.

Na imagem acima é possível observar que apesar de existir uma diferença entre a média agrupada (2.599) e desagrupada (2.584), o valor é muito baixo (0.015), não havendo a necessidade da utilização de pesos de desagrupamento.

4.2 Análise estrutural dos dados - Variografia

A análise estrutural foi realizada com o auxílio dos variogramas experimentais e, posteriormente, do modelo construído a partir dos variogramas experimentais. Com o auxílio dos variogramas foi possível delimitar as direções de maior e de menor continuidade do fenômeno regionalizado “densidade”, para cada método de obtenção da mesma e para cada litologia. Serão apresentados a seguir os variogramas omnidirecional e multidirecional (contando com três direções, a de maior continuidade, a de menor continuidade e a vertical), na forma de tabela com os parâmetros utilizados e as imagens dos modelos variográficos.

Como foi citado anteriormente, para a construção correta de variogramas é necessário estabelecer parâmetros como o efeito pepita (*C0* ou *nugget effect*), o valor de *lag*, qual tipo de função matemática utilizar para modelar a curva, o número de contribuições utilizadas, entre

outras. A seguir serão apresentados todos os variogramas construídos para cada um dos métodos de obtenção da densidade e para todas as litologias. Para todos os variogramas foi estabelecido tolerância angular de 45° na direção vertical e 22.5° para as direções de maior e menor continuidade, tolerância de Lag de 50%, a utilização de duas contribuições (C1 e C2) e função esférica (*spherical*). Já para as figuras, a direção de maior continuidade é representada na cor vermelha, a de menor continuidade pela cor verde e a direção vertical em azul. A ordem em que serão apresentadas será o IC, seguido pelo IF e IFR, sempre apresentando primeiro o método do CNM, depois gama-gama e por último os métodos de ensaios diretos de laboratório.

Itabirito Compacto - IC

CNM

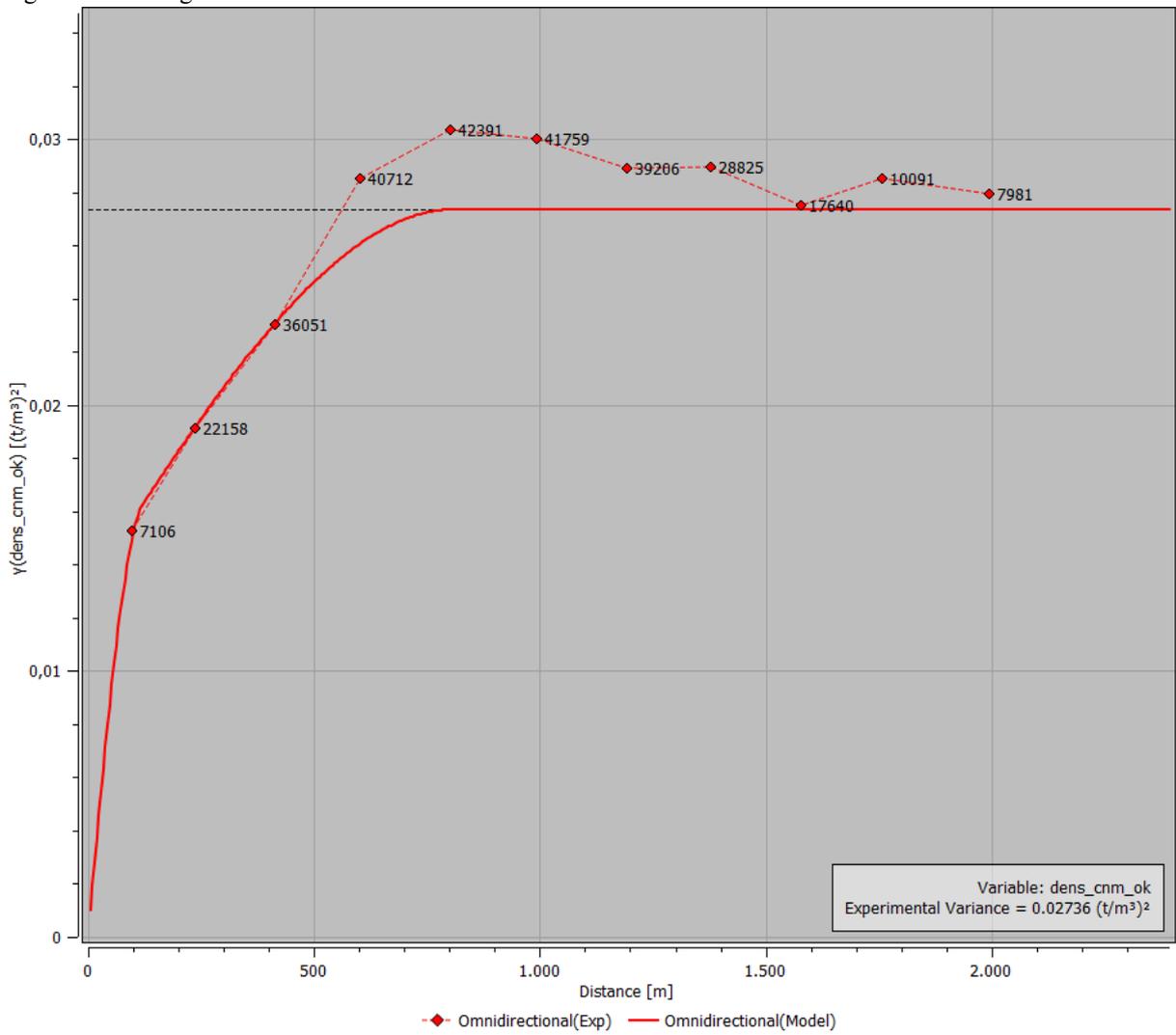
A Tabela 7 a seguir mostra como foi construído o variograma omnidirecional para a litologia IC e método CNM. A Figura 38 abaixo mostra o variograma omnidirecional modelado a partir dos parâmetros definidos. Já a Tabela 8 e Figura 39 abaixo representam o variograma multidirecional para a litologia IC e o método do CNM.

Tabela 7 - Variograma omnidirecional para a litologia IC e método CNM.

Experimental	
Lag (m)	200
Distância máxima (m)	2000
Tolerância do Lag (%)	90
Modelo	
C0	0.0001
C1	0.013
C2	0.01426
Alcance 1 (m)	120
Alcance 2 (m)	810

Fonte: autor.

Figura 38 - Variograma omnidirecional modelado.



Fonte: elaborado pelo autor utilizando o *software Isatis.neo*.

Tabela 8 - Variograma multidirecional para a litologia IC e método CNM.

Experimental			
Dip	0	0	90
Dip Azimuth	90	0	
Lag (m)	150	150	25
Distância máx (m)	1500	1500	150
Tolerância Lag (%)	50	50	50
Tolerância angular	22.5°	22.5°	45°
Modelo			
C0	0.0001	0.0001	0.0001
C1	0.013	0.013	0.013
C2	0.01426	0.01426	0.01426
Alcance 1 (m)	600	205	100
Alcance 2 (m)	750	245	105

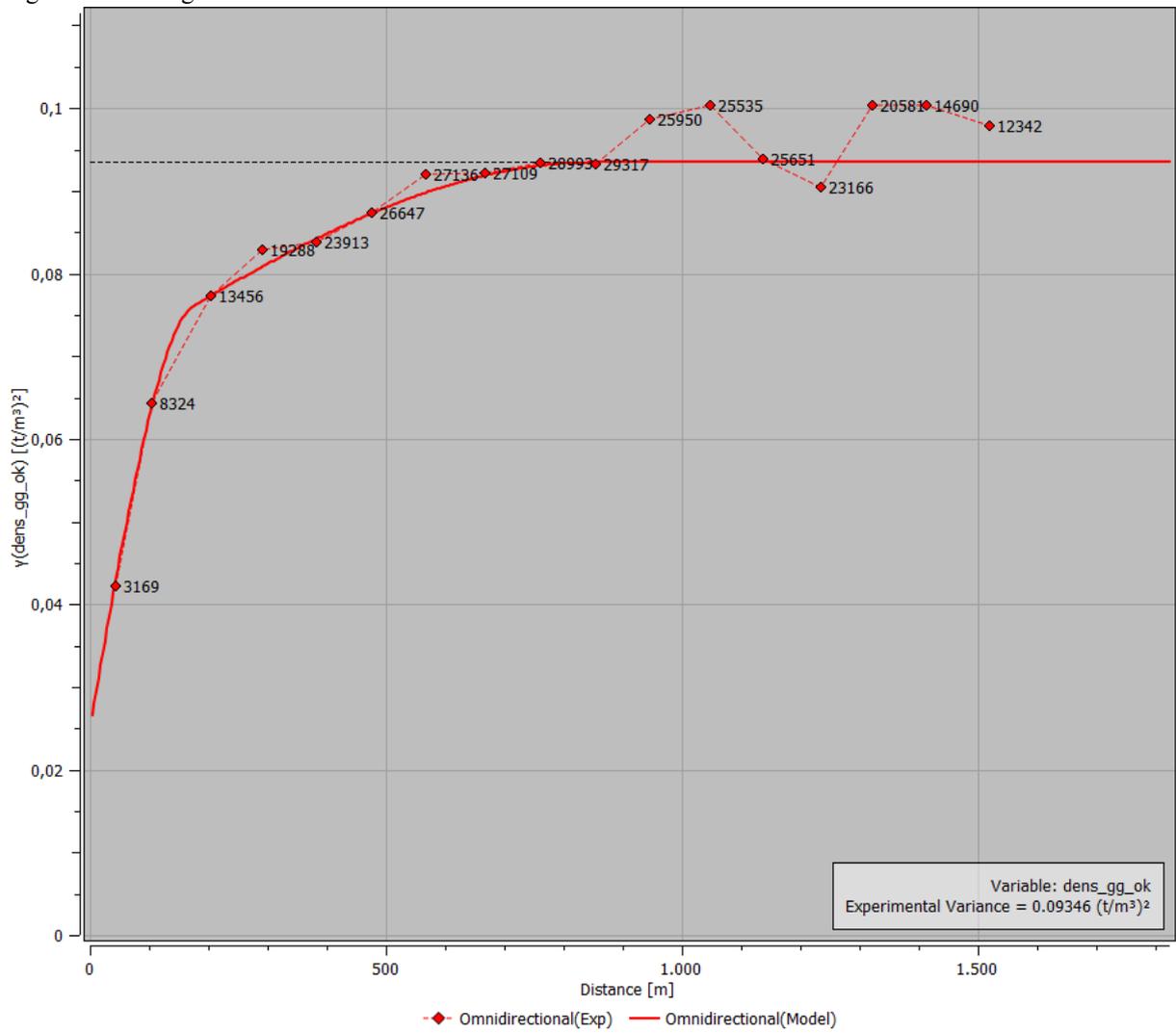
Fonte: autor.

Tabela 9 - Variograma omnidirecional para a litologia IC e método gama-gama.

Experimental	
Lag (m)	95
Distância máxima (m)	2000
Tolerância do Lag (%)	90
Modelo	
C0	0.025
C1	0.04346
C2	0.02486
Alcance 1 (m)	175
Alcance 2 (m)	850

Fonte: autor.

Figura 40 - Variograma omnidirecional modelado.



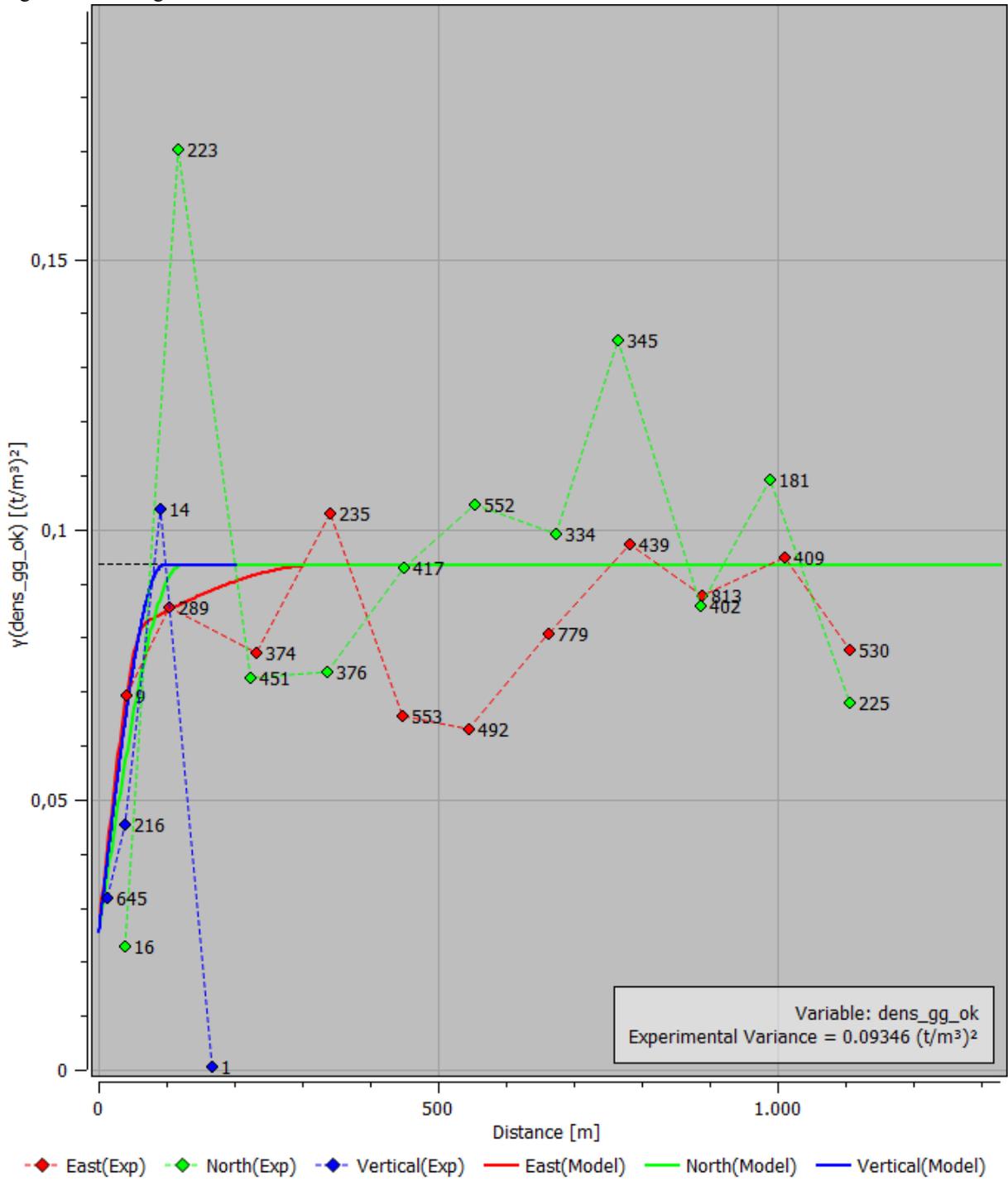
Fonte: elaborado pelo autor utilizando o *software Isatis.neo*.

Tabela 10 - Variograma multidirecional para a litologia IC e método gama-gama.

Experimental			
Dip	0	0	90
Dip Azimuth	90	0	
Lag (m)	111	111	51
Distância máx (m)	1200	1200	200
Tolerância Lag (%)	50	50	50
Tolerância angular	22.5°	22.5°	45°
Modelo			
C0	0.025	0.025	0.025
C1	0.053	0.053	0.053
C2	0.01546	0.01546	0.01546
Alcance 1 (m)	70	120	95
Alcance 2 (m)	330	130	100

Fonte: autor.

Figura 41 - Variograma multidirecional modelado.



Fonte: elaborado pelo autor utilizando o software *Isatis.neo*.

Ensaaios diretos

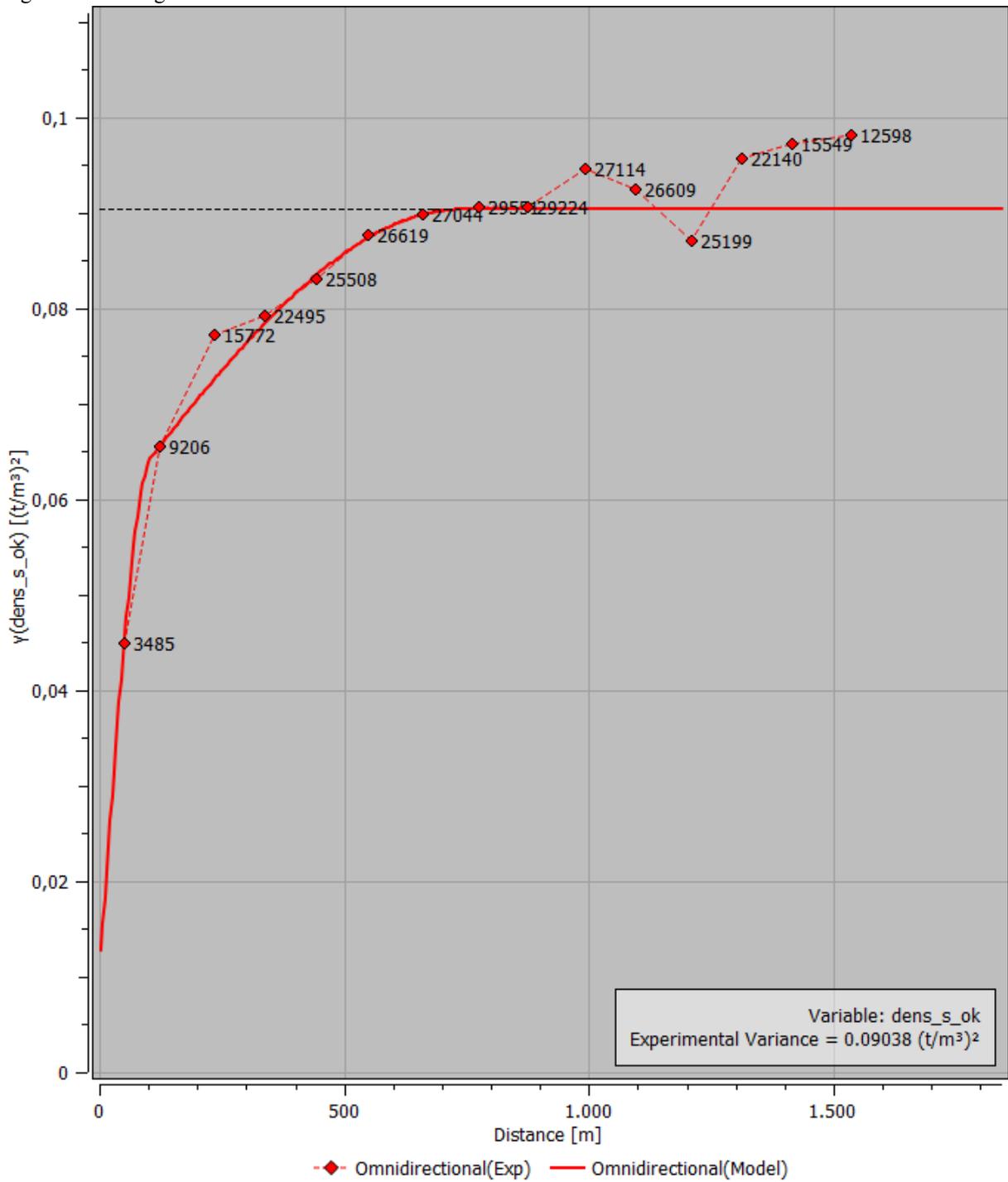
A Tabela 11 e Figura 42 abaixo representam o variograma omnidirecional modelado para a litologia IC e o método dos ensaios diretos de laboratório. Já a Tabela 12 e Figura 43 dizem respeito ao variograma multidirecional.

Tabela 11 - Variograma omnidirecional para a litologia IC e método ensaios diretos de laboratório.

Experimental	
Lag (m)	110
Distância máxima (m)	1600
Tolerância do Lag (%)	90
Modelo	
C0	0.01
C1	0.04738
C2	0.033
Alcance 1 (m)	105
Alcance 2 (m)	740

Fonte: autor.

Figura 42 - Variograma omnidirecional modelado.



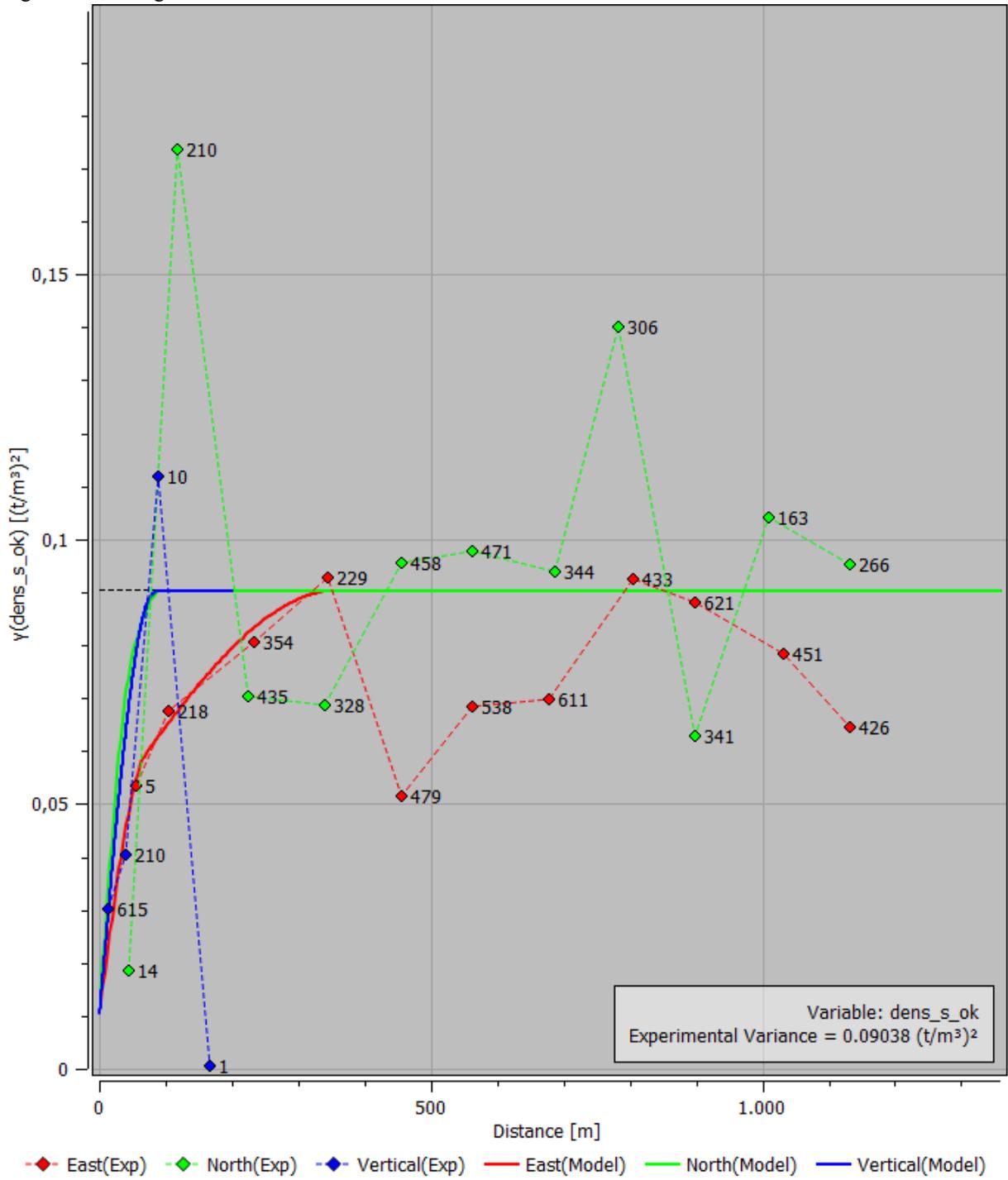
Fonte: elaborado pelo autor utilizando o *software Isatis.neo*.

Tabela 12 - Variograma multidirecional para a litologia IC e método dos ensaios diretos de laboratório.

Experimental			
Dip	0	0	90
Dip Azimuth	90	0	
Lag (m)	113	113	51
Distância máx (m)	1200	1200	200
Tolerância Lag (%)	50	50	50
Tolerância angular	22.5°	22.5°	45°
Modelo			
C0	0.01	0.01	0.01
C1	0.0369	0.0369	0.0369
C2	0.04348	0.04348	0.04348
Alcance 1 (m)	70	50	75
Alcance 2 (m)	360	95	90

Fonte: autor.

Figura 43 - Variograma multidirecional modelado.



Fonte: elaborado pelo autor utilizando o software *Isatis.neo*.

Itabirito Friável - IF

CNM

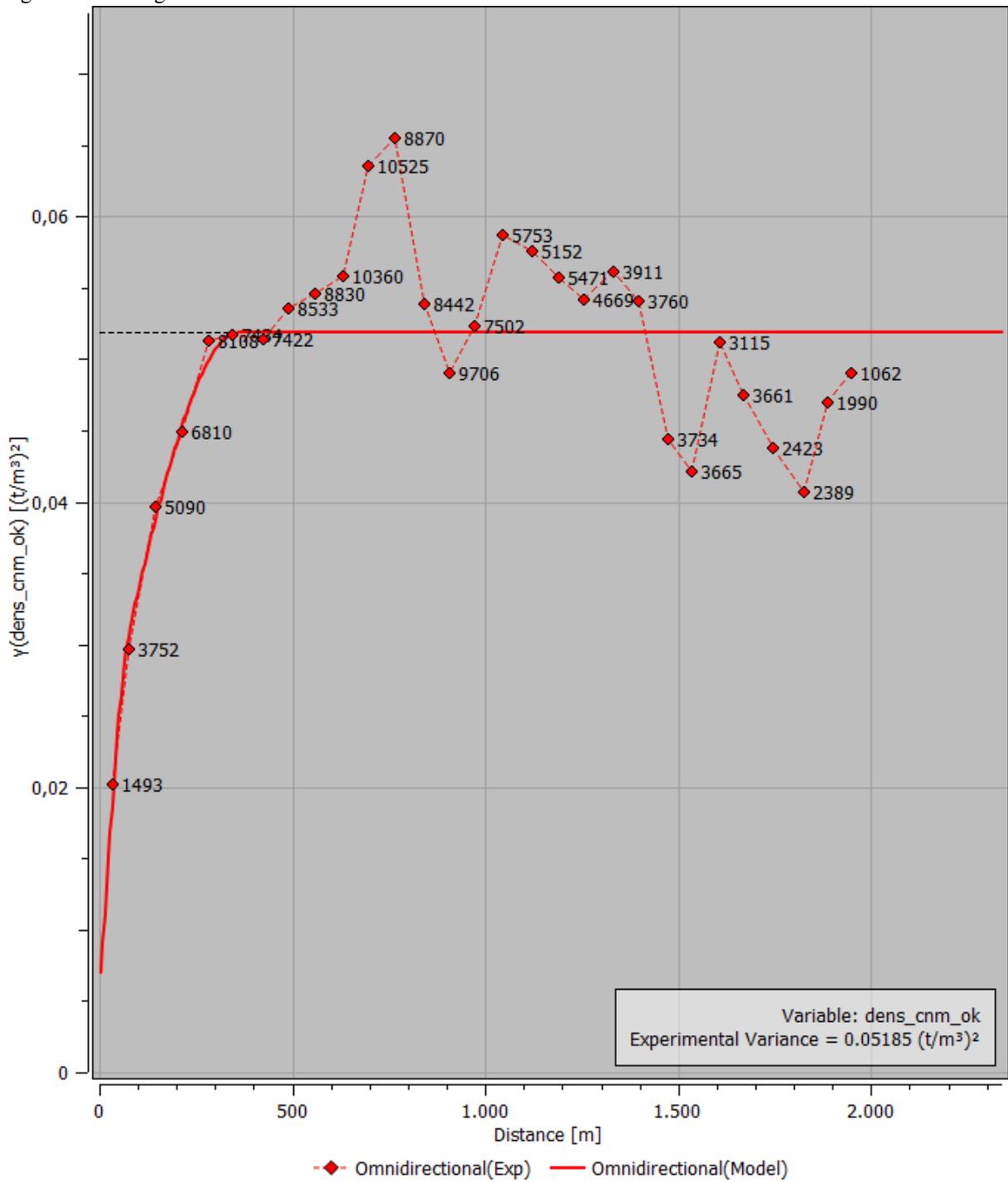
A Tabela 13 e a Figura 44 apresentadas abaixo representam o variograma omnidirecional. Já a Tabela 14 e Figura 45 representam o variograma multidirecional.

Tabela 13 - Variograma omnidirecional para a litologia IF e método CNM.

Experimental	
Lag (m)	70
Distância máxima (m)	2000
Tolerância do Lag (%)	90
Modelo	
C0	0.005
C1	0.0162
C2	0.03065
Alcance 1 (m)	80
Alcance 2 (m)	360

Fonte: autor.

Figura 44 - Variograma omnidirecional modelado.



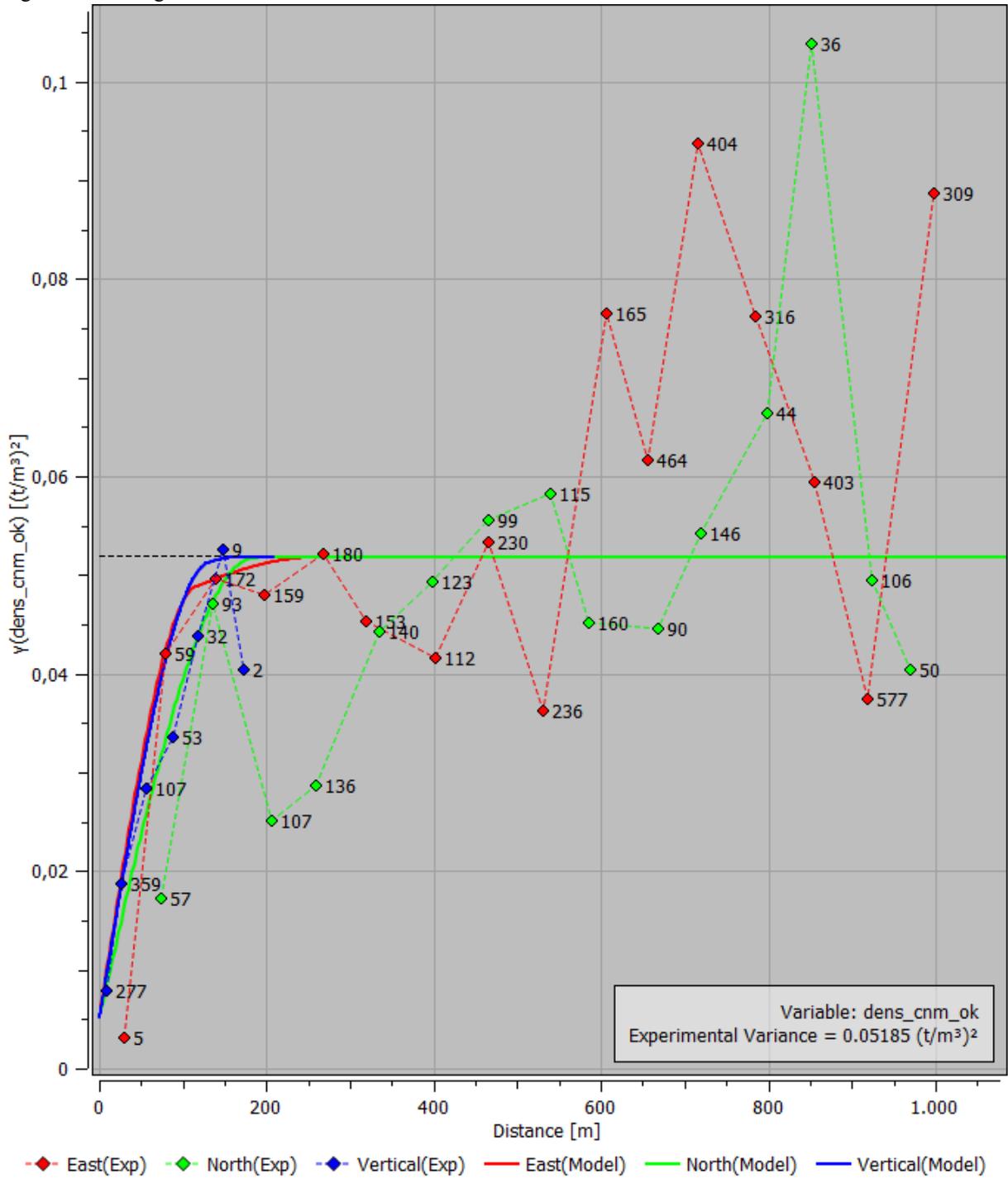
Fonte: elaborado pelo autor utilizando o *software Isatis.neo*.

Tabela 14 - Variograma multidirecional para a litologia IF e método CNM.

Experimental			
Dip	0	0	90
Dip Azimuth	90	0	
Lag (m)	66	66	30
Distância máx (m)	1000	1000	200
Tolerância Lag (%)	50	50	50
Tolerância angular	22.5°	22.5°	45°
Modelo			
C0	0.005	0.005	0.005
C1	0.039	0.039	0.039
C2	0.00785	0.00785	0.00785
Alcance 1 (m)	115	180	130
Alcance 2 (m)	265	210	170

Fonte: autor.

Figura 45 - Variograma multidirecional modelado.



Fonte: elaborado pelo autor utilizando o *software Isatis.neo*.

Gama-Gama

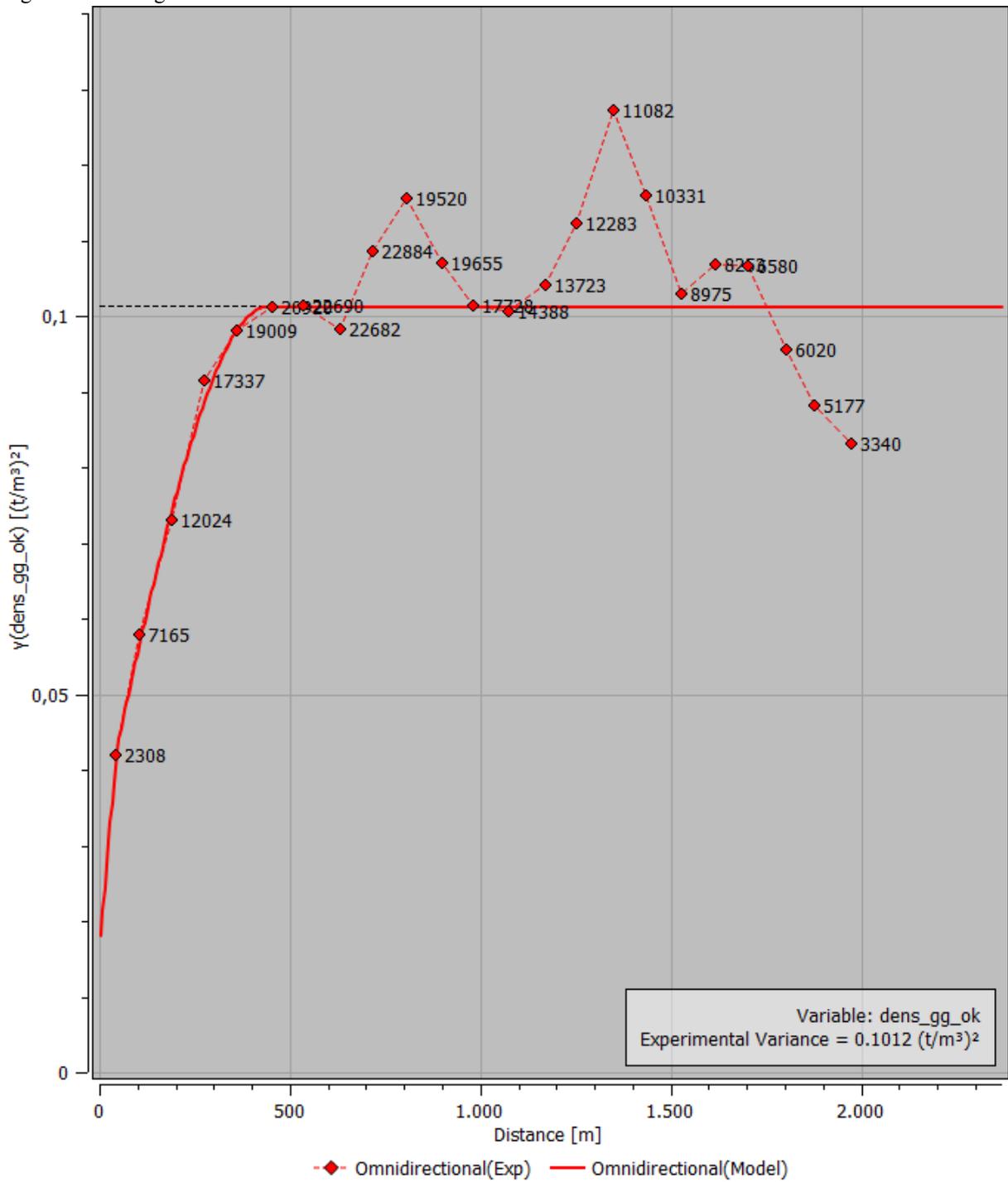
O variograma omnidirecional está de acordo com a Tabela 15 e Figura 46. Já a Tabela 16 e a Figura 47 representam o variograma multidirecional para a litologia IF e o método da perfilagem geofísica gama-gama.

Tabela 15 - Variograma omnidirecional para a litologia IF e método gama-gama.

Experimental	
Lag (m)	90
Distância máxima (m)	2000
Tolerância do Lag (%)	90
Modelo	
C0	0.015
C1	0.0172
C2	0.069
Alcance 1 (m)	60
Alcance 2 (m)	440

Fonte: autor.

Figura 46 - Variograma omnidirecional modelado.



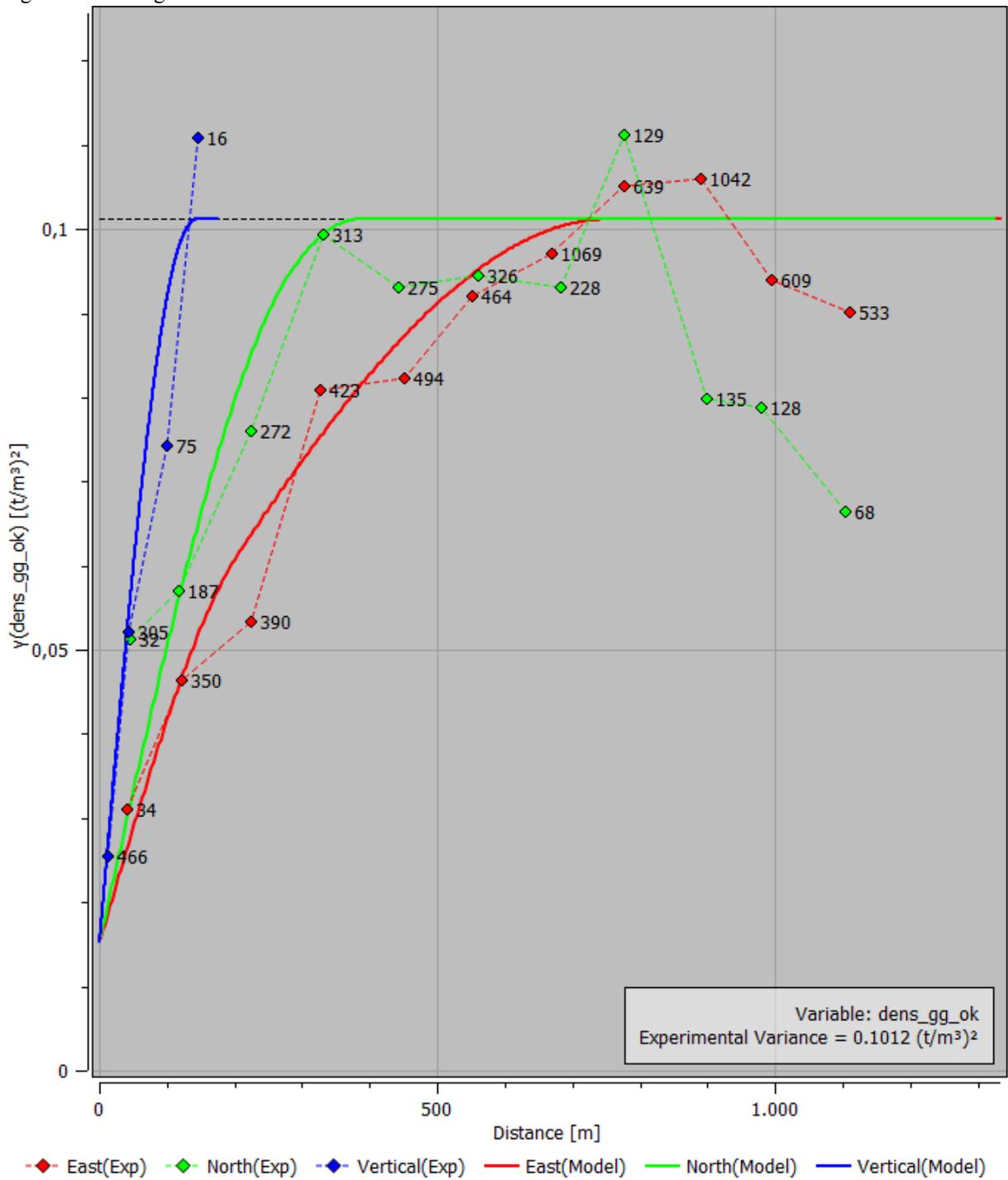
Fonte: elaborado pelo autor utilizando o *software Isatis.neo*.

Tabela 16 - Variograma multidirecional para a litologia IF e método gama-gama.

Experimental			
Dip	0	0	90
Dip Azimuth	90	0	
Lag (m)	111	111	51
Distância máx (m)	1200	1200	200
Tolerância Lag (%)	50	50	50
Tolerância angular	22.5°	22.5°	45°
Modelo			
C0	0.015	0.015	0.015
C1	0.02	0.02	0.02
C2	0.0662	0.0662	0.0662
Alcance 1 (m)	205	285	120
Alcance 2 (m)	755	385	145

Fonte: autor.

Figura 47 - Variograma multidirecional modelado.



Fonte: elaborado pelo autor utilizando o *software Isatis.neo*.

Ensaio diretos

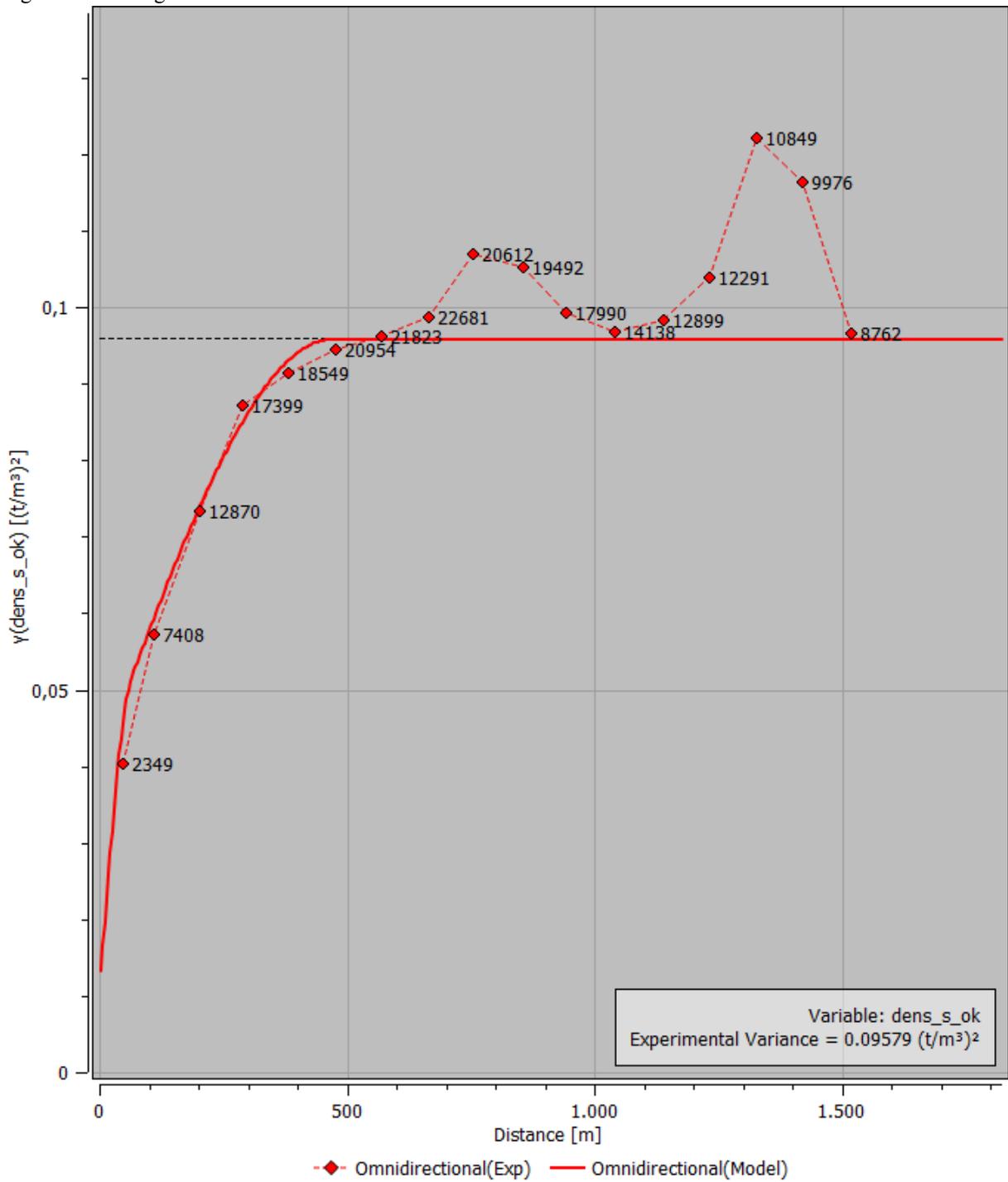
Os variogramas relativos ao método de ensaios diretos para obtenção de densidade estão representados pela Tabela 17 e Figura 48 (omnidirecional), além da Tabela 18 e Figura 49 (multidirecional).

Tabela 17 - Variograma omnidirecional para a litologia IF e método dos ensaios diretos.

Experimental	
Lag (m)	95
Distância máxima (m)	1600
Tolerância do Lag (%)	90
Modelo	
C0	0.01021
C1	0.03
C2	0.055669
Alcance 1 (m)	65
Alcance 2 (m)	470

Fonte: autor.

Figura 48 - Variograma omnidirecional modelado.



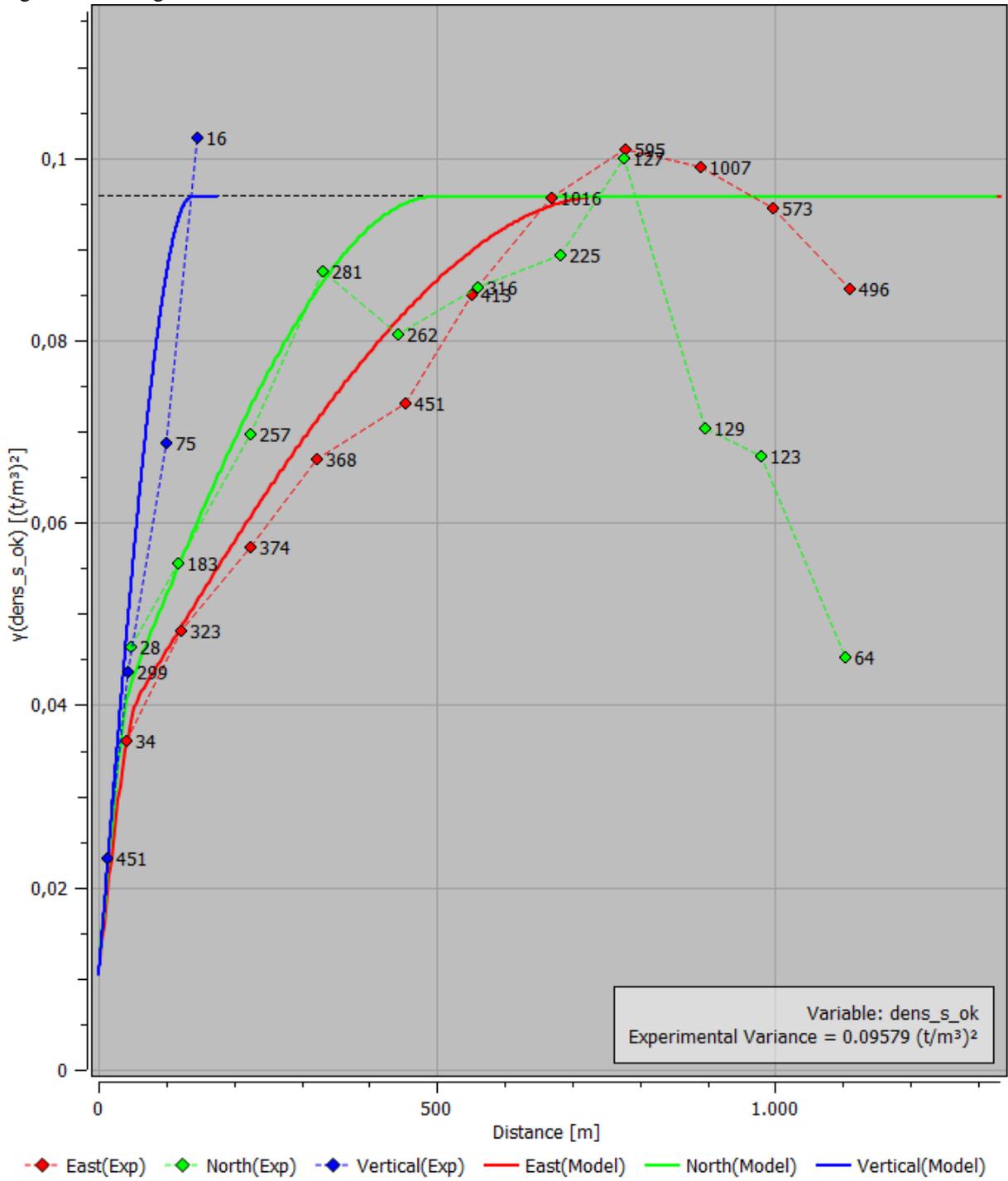
Fonte: elaborado pelo autor utilizando o *software Isatis.neo*.

Tabela 18 - Variograma multidirecional para a litologia IF e método gama-gama.

Experimental			
Dip	0	0	90
Dip Azimuth	90	0	
Lag (m)	111	111	30
Distância máx (m)	1200	1200	200
Tolerância Lag (%)	50	50	50
Tolerância angular	22.5°	22.5°	45°
Modelo			
C0	0.01	0.01	0.01
C1	0.0235	0.0235	0.0235
C2	0.06229	0.06229	0.06229
Alcance 1 (m)	60	50	130
Alcance 2 (m)	750	500	140

Fonte: autor.

Figura 49 - Variograma multidirecional modelado.



Fonte: elaborado pelo autor utilizando o *software Isatis.neo*.

Itabirito Friável Rico - IFR

CNM

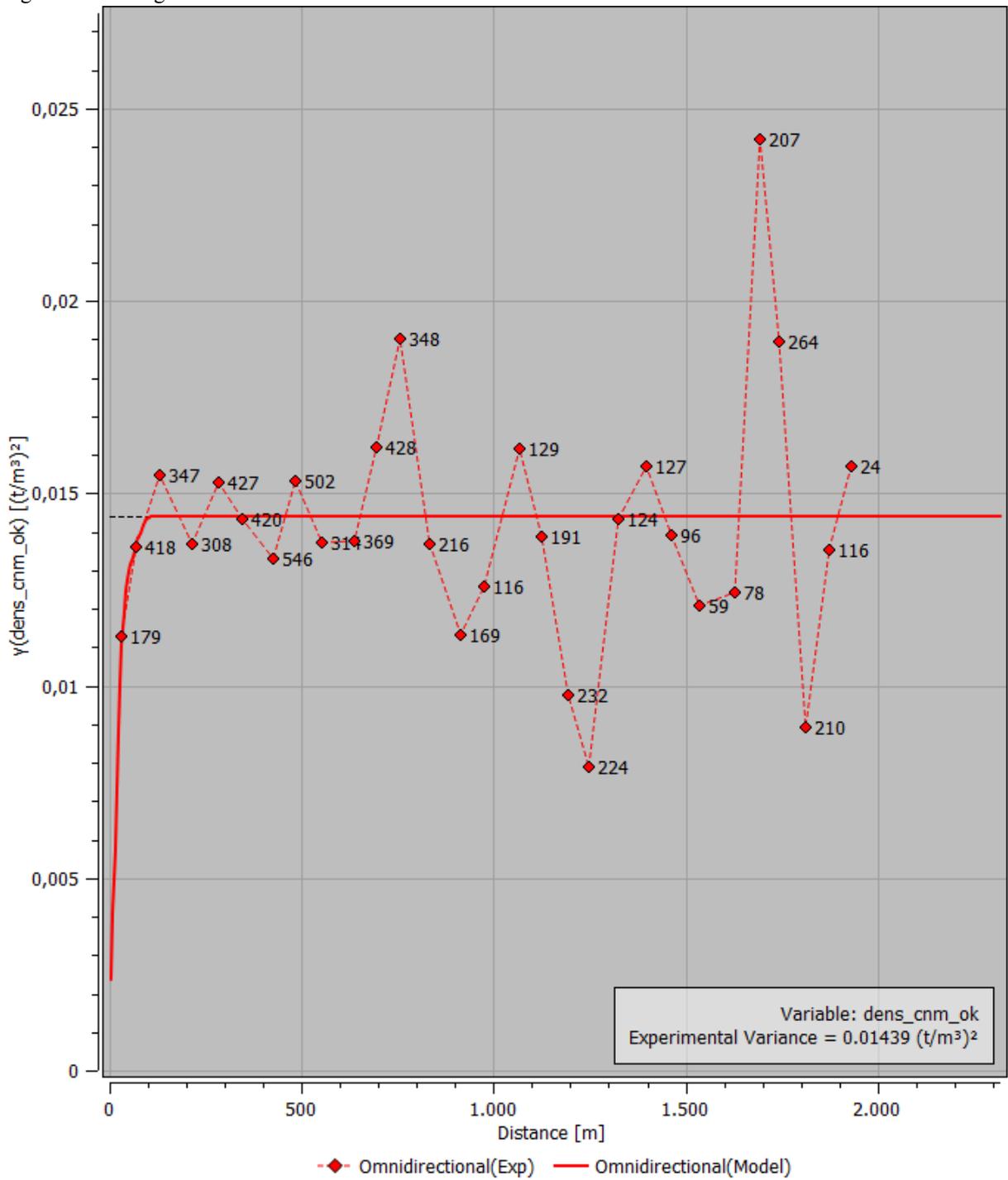
Os variogramas omnidirecional e multidirecional estão representados pelas Tabelas 19 e 20, além das Figuras 50 e 51, respectivamente.

Tabela 19 - Variograma omnidirecional para a litologia IFR e método do CNM.

Experimental	
Lag (m)	70
Distância máxima (m)	1500
Tolerância do Lag (%)	2000
Modelo	
C0	0.0006
C1	0.0097
C2	0.00409
Alcance 1 (m)	45
Alcance 2 (m)	110

Fonte: autor.

Figura 50 - Variograma omnidirecional modelado.



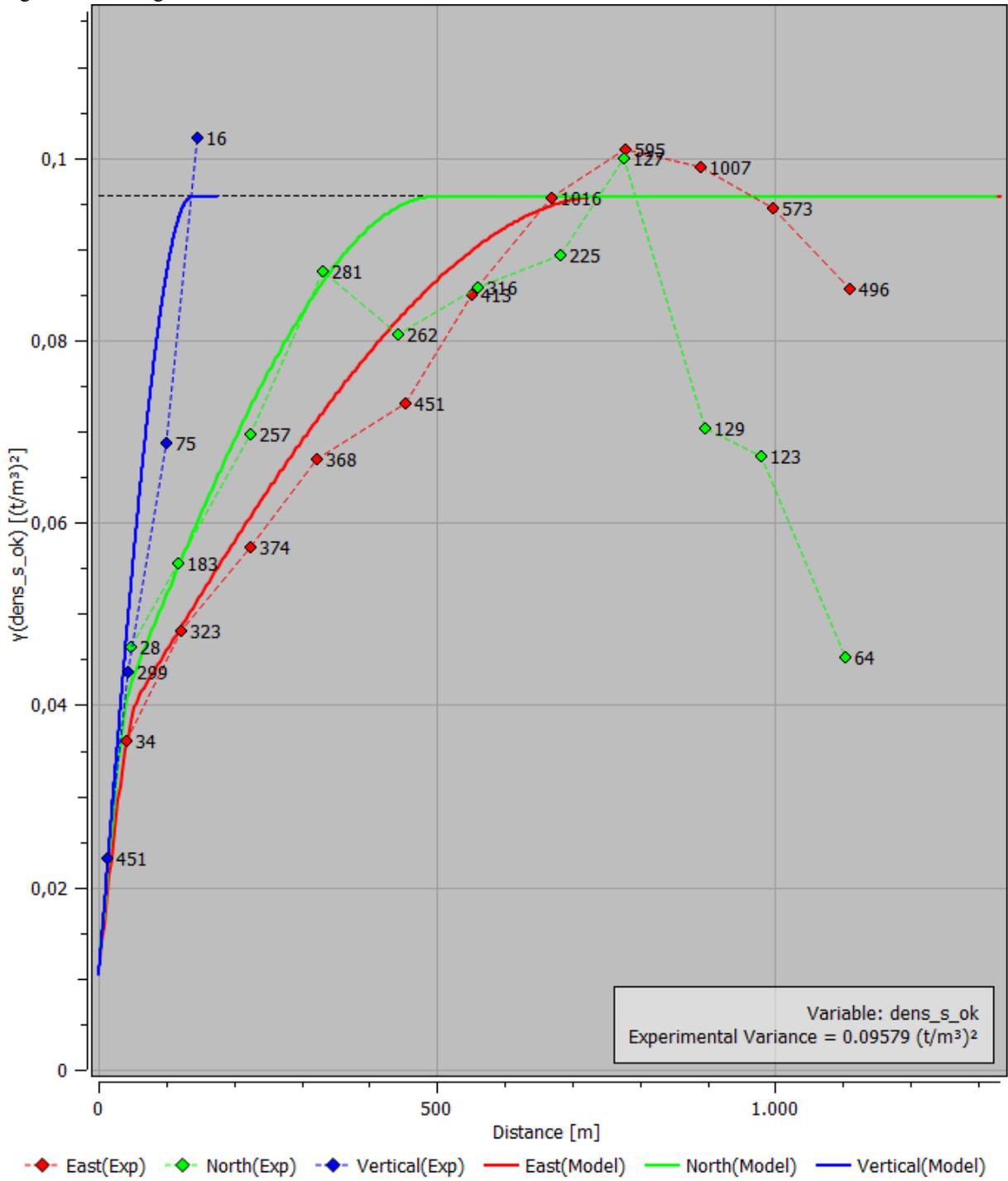
Fonte: elaborado pelo autor utilizando o *software Isatis.neo*.

Tabela 20 - Variograma multidirecional para a litologia IFR e método CNM.

Experimental			
Dip	0	0	90
Dip Azimuth	90	0	
Lag (m)	110	110	10
Distância máx (m)	1100	1100	60
Tolerância Lag (%)	50	50	50
Tolerância angular	22.5°	22.5°	45°
Modelo			
C0	0.0006	0.0006	0.0006
C1	0.0097	0.0097	0.0097
C2	0.00409	0.00409	0.00409
Alcance 1 (m)	325	180	40
Alcance 2 (m)	575	250	60

Fonte: autor.

Figura 51 - Variograma multidirecional modelado.



Fonte: elaborado pelo autor utilizando o software *Isatis.neo*.

Gama-gama

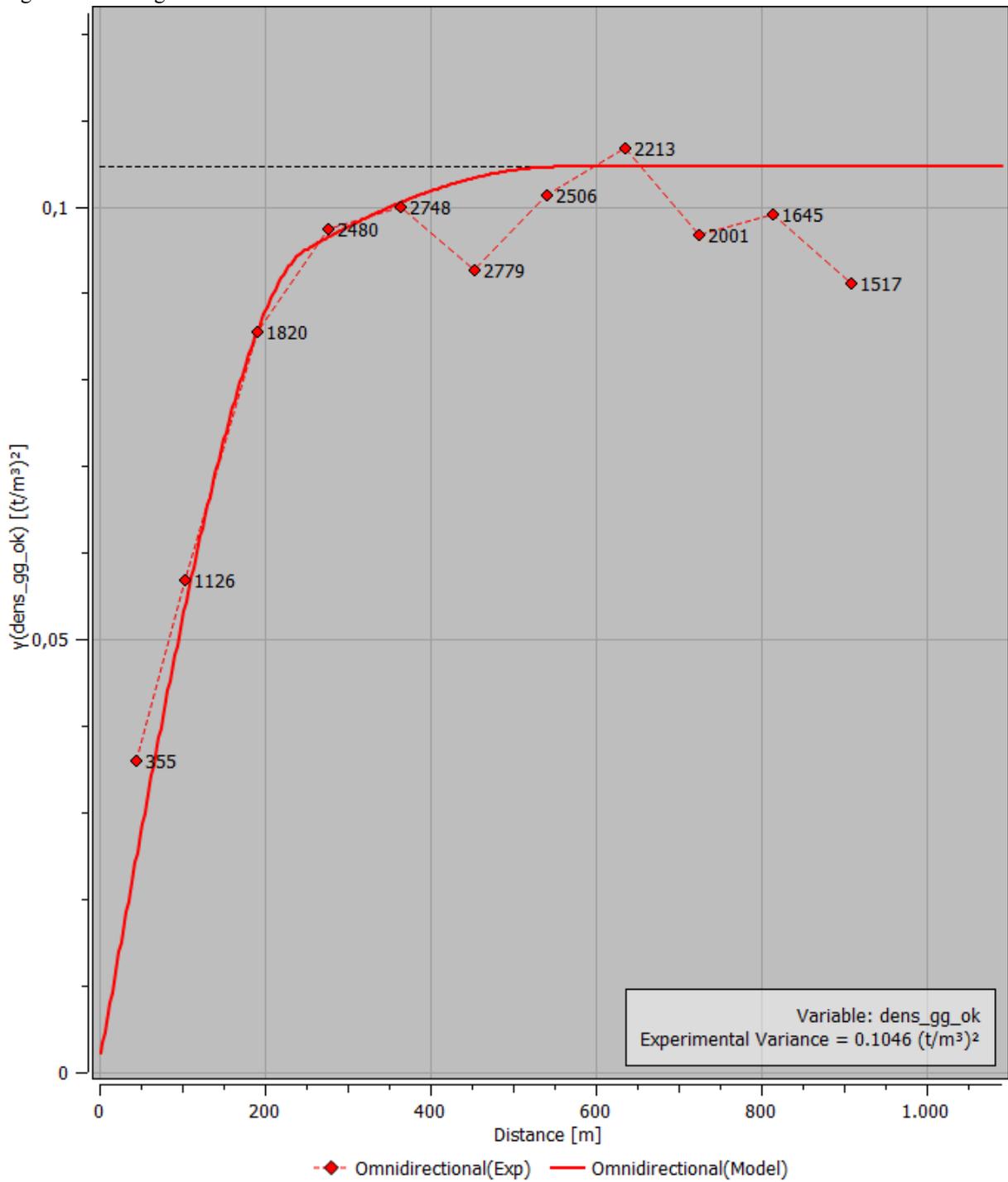
Para a litologia IFR e método de perfilagem geofísica gama-gama os variogramas estão representados pelas Tabelas 21 e 22, além das Figuras 52 e 53.

Tabela 21 - Variograma omnidirecional para a litologia IFR e método da perfilagem geofísica gama-gama.

Experimental	
Lag (m)	91
Distância máxima (m)	1000
Tolerância do Lag (%)	90
Modelo	
C0	0.001
C1	0.078
C2	0.0256
Alcance 1 (m)	250
Alcance 2 (m)	560

Fonte: autor.

Figura 52 - Variograma omnidirecional modelado.



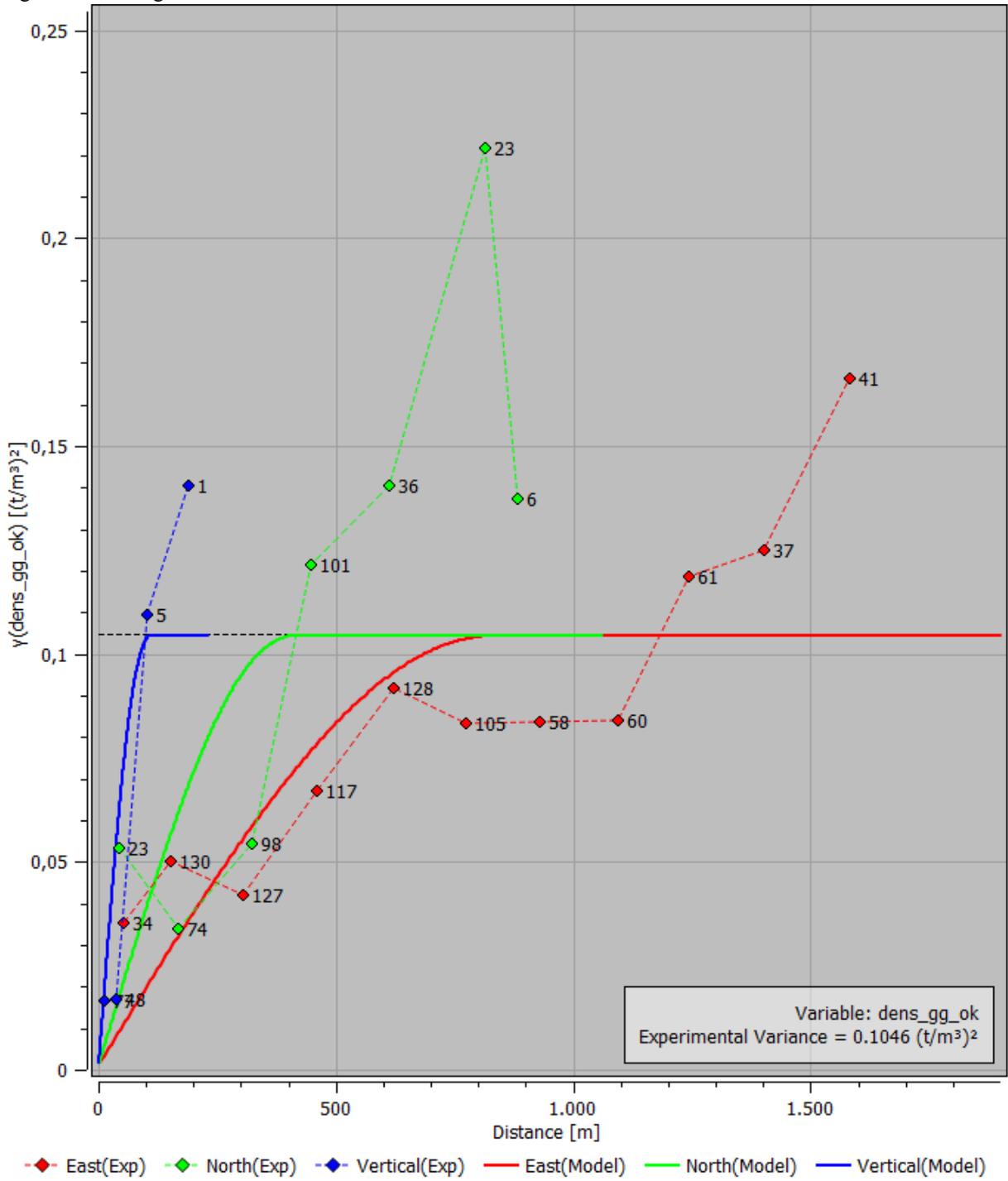
Fonte: elaborado pelo autor utilizando o *software Isatis.neo*.

Tabela 22 - Variograma multidirecional para a litologia IFR e método da perfilagem geofísica gama-gama.

Experimental			
Dip	0	0	90
Dip Azimuth	90	0	
Lag (m)	156	156	50
Distância máx (m)	1600	1600	200
Tolerância Lag (%)	50	50	50
Tolerância angular	22.5°	22.5°	45°
Modelo			
C0	0.001	0.001	0.001
C1	0.02	0.02	0.02
C2	0.0836	0.0836	0.0836
Alcance 1 (m)	750	350	80
Alcance 2 (m)	850	420	110

Fonte: autor.

Figura 53 - Variograma multidirecional modelado.



Fonte: elaborado pelo autor utilizando o *software Isatis.neo*.

Ensaio direto

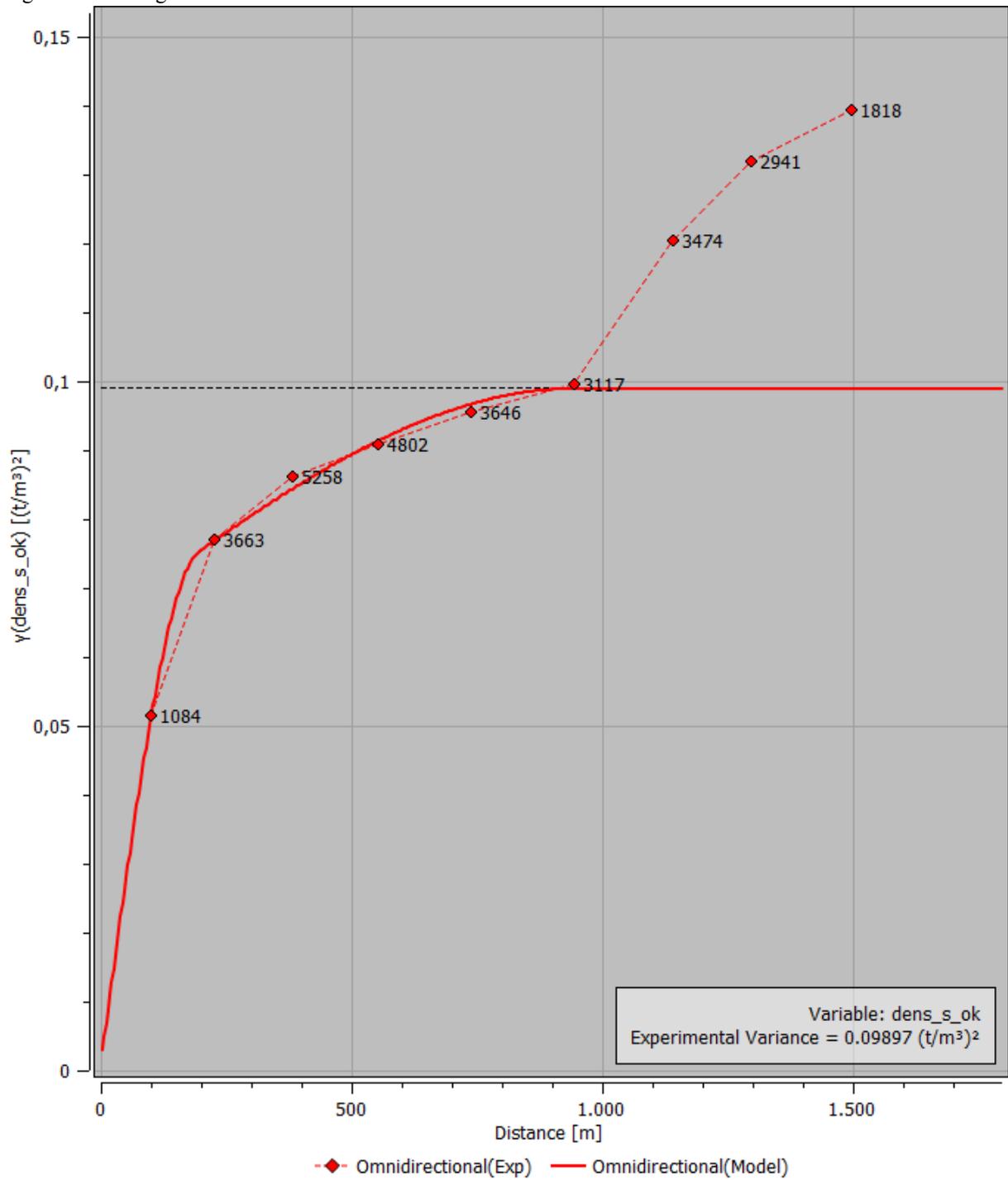
Para o método dos ensaios diretos de laboratório para obtenção de densidade, os variogramas omnidirecional e multidirecional estão representados pelas Tabelas 23 e 24, além das Figuras 54 e 55.

Tabela 23- Variograma omnidirecional para a litologia IFR e método dos ensaios diretos de laboratório.

Experimental	
Lag (m)	189
Distância máxima (m)	2000
Tolerância do Lag (%)	90
Modelo	
C0	0.001
C1	0.0638
C2	0.03417
Alcance 1 (m)	195
Alcance 2 (m)	945

Fonte: autor.

Figura 54 - Variograma omnidirecional modelado.



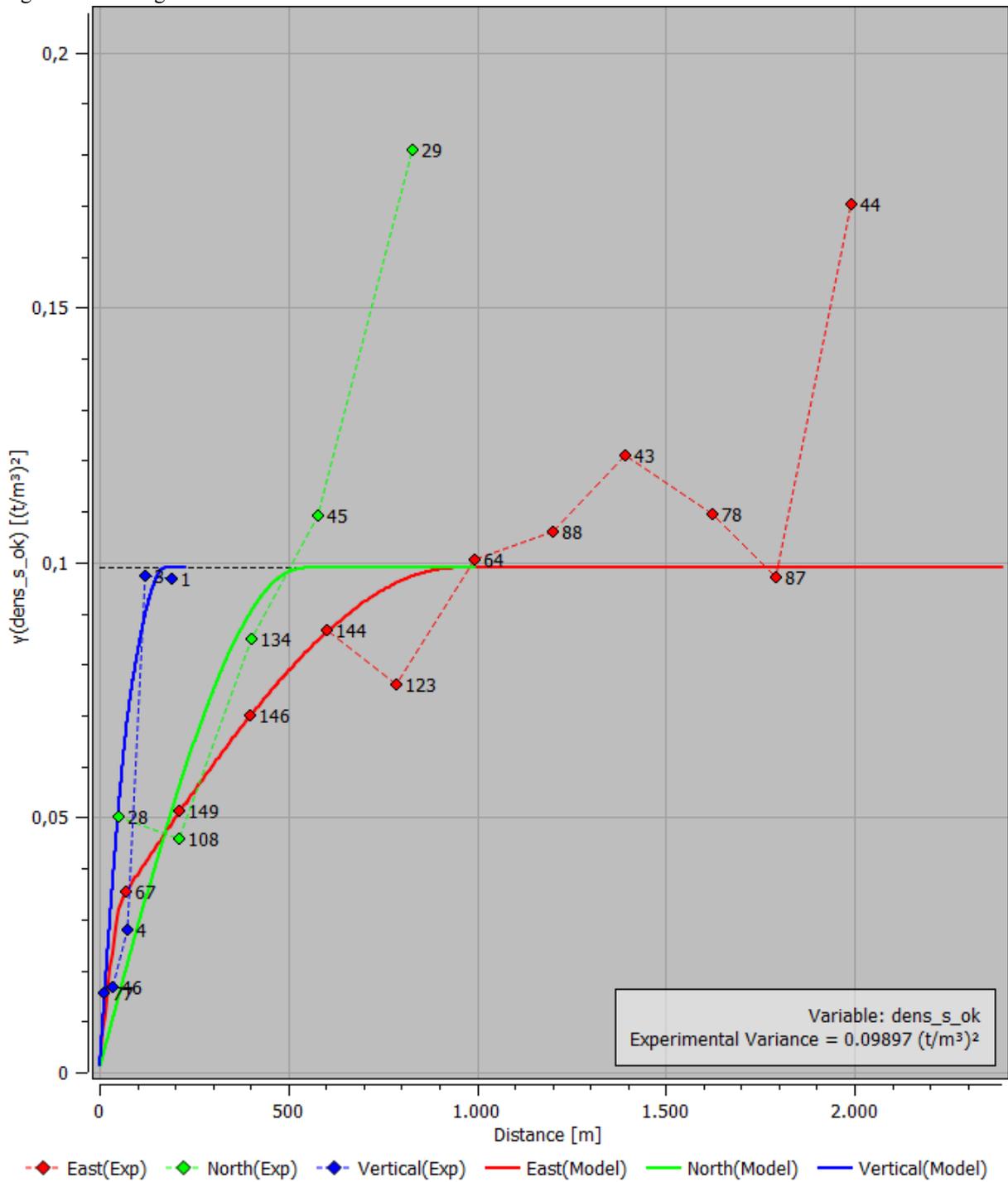
Fonte: elaborado pelo autor utilizando o *software Isatis.neo*.

Tabela 24 - Variograma multidirecional para a litologia IFR e método dos ensaios diretos de laboratório.

Experimental			
Dip	0	0	90
Dip Azimuth	90	0	
Lag (m)	200	200	45
Distância máx (m)	200	2000	200
Tolerância Lag (%)	50	50	50
Tolerância angular	22.5°	22.5°	45°
Modelo			
C0	0.001	0.001	0.001
C1	0.0264	0.0264	0.0264
C2	0.07157	0.07157	0.07157
Alcance 1 (m)	65	500	85
Alcance 2 (m)	950	550	175

Fonte: autor.

Figura 55 - Variograma multidirecional modelado.



Fonte: elaborado pelo autor utilizando o *software Isatis.neo*.

4.3 Estimativas de densidade por krigagem ordinária

Após realizada a análise espacial do fenômeno densidade para cada litologia e para cada método diferente de obtenção da mesma, foi possível realizar as estimativas através da krigagem ordinária. Para todas as litologias, foi realizada a krigagem por blocos. Como citado anteriormente, as estimativas foram produzidas utilizando um modelo de blocos de 10m x 10m x 10m, o resultado será apresentado na forma de tabela contendo o sumário estatístico da variável estimada, além da figura contendo o volume de rocha cuja densidade foi calculada. Para poder selecionar os melhores parâmetros para a estimativa, foram conduzidos testes com diferentes raios de busca, número de amostras por setor, número mínimo e máximo de amostras, estes testes serão apresentadas no Anexo deste trabalho na forma de tabelas. É importante ressaltar que foi selecionado como melhor parâmetro para a estimativa aquele que obtivesse uma baixa média de erro, alta correlação entre valor real e valor estimado, mas também um número alto de dados robustos.

As Figuras apresentadas a seguir representam as estimativas produzidas. Nas imagens podemos observar pontos vermelhos (para todas as litologias, os métodos gama-gama e ensaios diretos) e pontos brancos (para todas as litologias o método do CNM). Estes pontos representam as amostras catalogadas como IC, IF e IFR respectivamente, porém não representam aquele método específico de obtenção de densidade, apenas que aquele furo representa aquela litologia. A escolha da cor diferente (branca) para representar o método do CNM é devido à alta presença de cores mais quentes na figura, de tal maneira que o branco foi aquele que apresentou o melhor contraste, destacando melhor os pontos no mapa.

IC

CNM

Para a estimativa da litologia IC e método do CNM foram adotados os seguintes parâmetros, exibidos na Tabela 25 abaixo. Já a Tabela 26 abaixo apresenta o sumário estatístico da variável densidade estimada.

Tabela 25 - Parâmetros adotados para a estimativa de densidade da litologia IC e método CNM.

Raio U	Raio V	Raio W	Nº de setores angulares	Nº máximo de amostras por setor	Nº máximo de amostras	Nº mínimo de amostras
600	195	85	1	16	16	4

Fonte: autor.

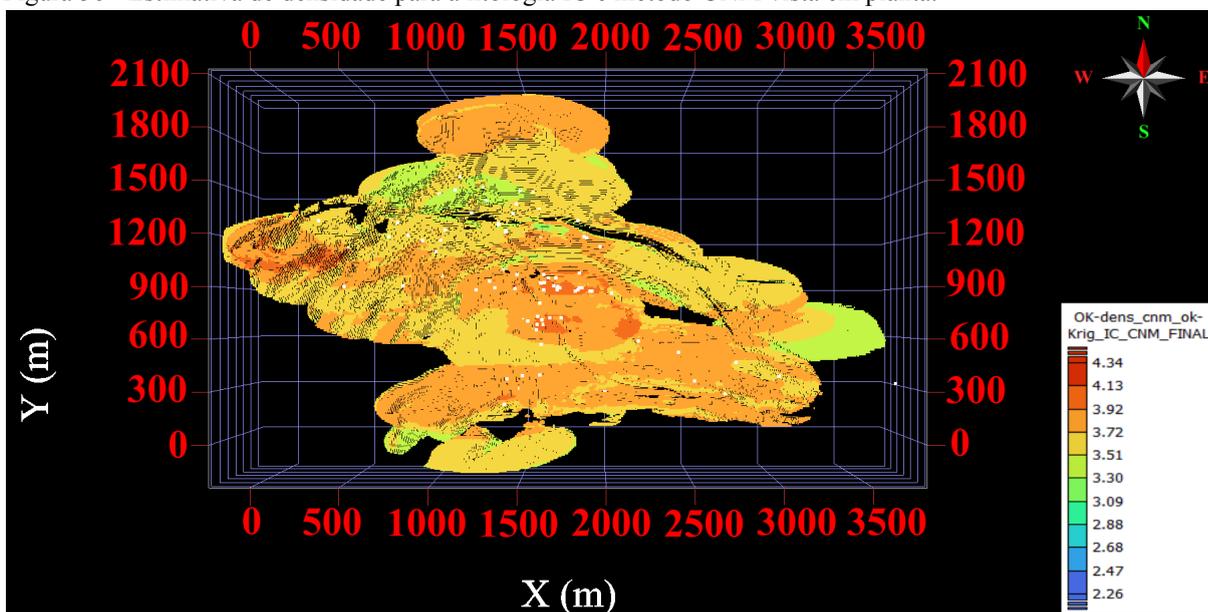
Tabela 26 - Sumário estatístico da densidade estimada a partir da krigagem ordinária para a litologia IC e método CNM.

Nº total de blocos	Nº de blocos estimados	Média (ton/m ³)	Variância	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
16,005,600	862,740	3.65	0.01778	0.13	3.17	4.34

Fonte: autor.

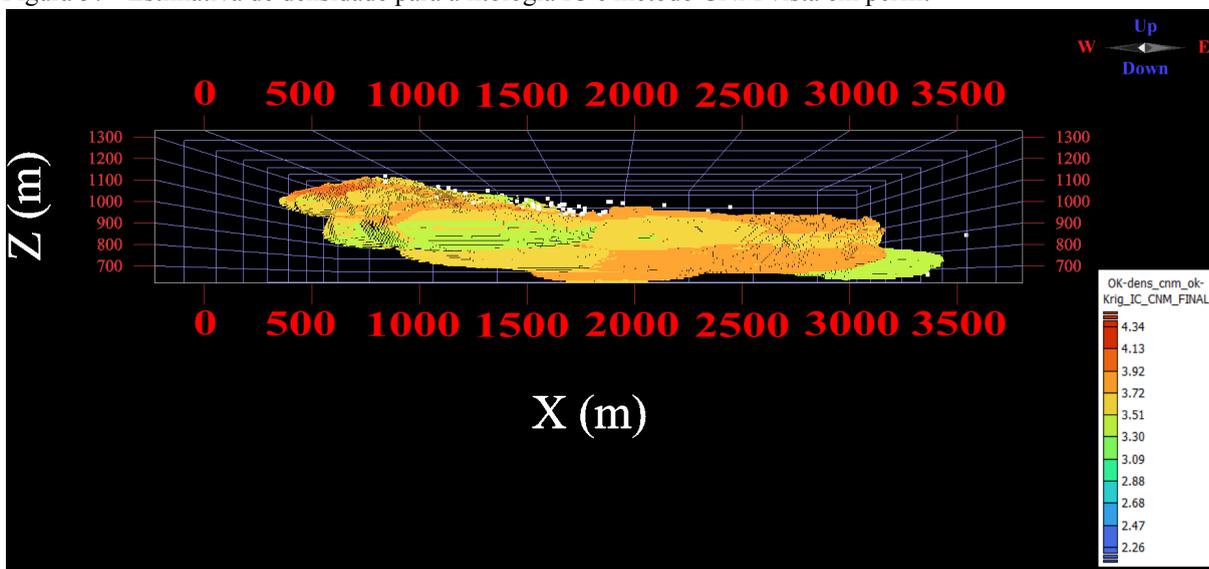
Como cada bloco tem 1000m³ de volume, o volume de rocha será dado pelo nº de blocos estimados multiplicado pelo volume de cada bloco. Assim, o volume de rocha estimado é de 862,740,000m³ de rocha (oitocentos e sessenta e dois milhões, setecentos e quarenta mil metros cúbicos). As Figuras 56 e 57 a seguir representam a estimativa vista em planta e em perfil.

Figura 56 - Estimativa de densidade para a litologia IC e método CNM vista em planta.



Fonte: elaborado pelo autor utilizando o *software Isatis.neo*.

Figura 57 - Estimativa de densidade para a litologia IC e método CNM vista em perfil.



Fonte: elaborado pelo autor utilizando o *software Isatis.neo*.

Gama-gama

A Tabela 27 apresenta os parâmetros utilizados para a estimativa, já a Tabela 28 apresenta o sumário estatístico da variável densidade para a litologia IC e método da perfilagem geofísica gama-gama.

Tabela 27 - Parâmetros adotados para a estimativa de densidade da litologia IC e método da perfilagem geofísica gama-gama.

Raio U	Raio V	Raio W	Nº de setores angulares	Nº máximo de amostras por setor	Nº máximo de amostras	Nº mínimo de amostras
200	80	60	1	16	16	3

Fonte: autor.

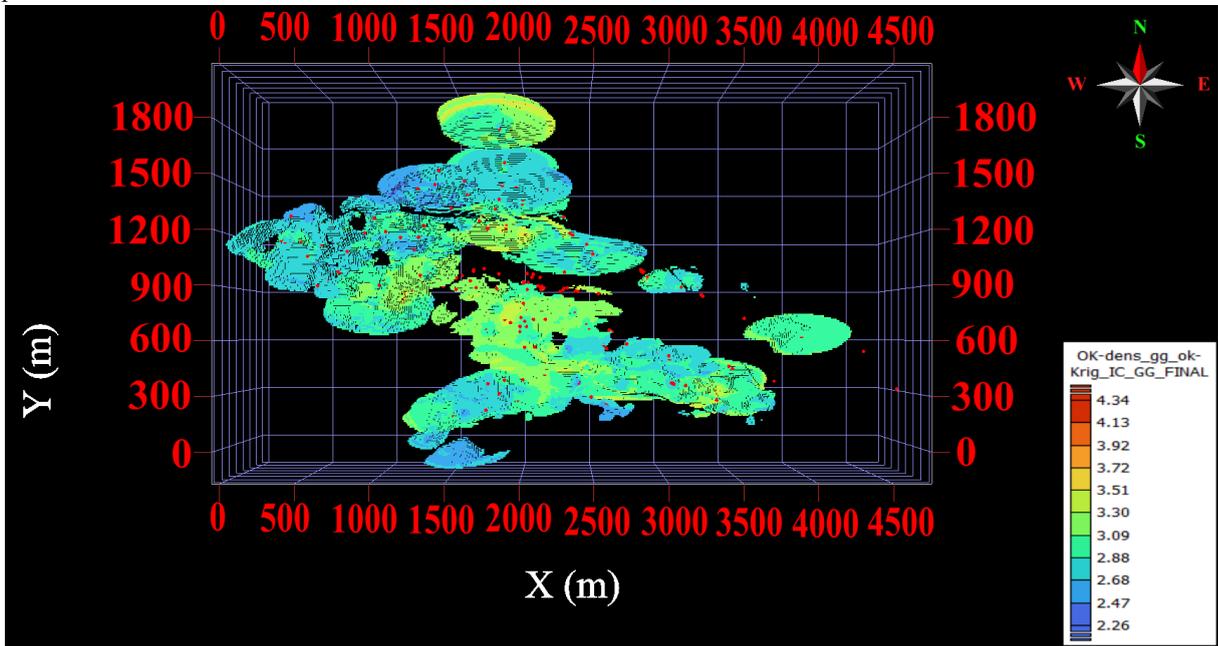
Tabela 28 - Sumário estatístico da densidade estimada a partir da krigagem ordinária para a litologia IC e método perfilagem geofísica gama-gama.

Nº total de blocos	Nº de blocos estimados	Média (ton/m³)	Variância	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
16,005,600	357,421	3.03	0.04548	0.21	2.42	3.60

Fonte: autor.

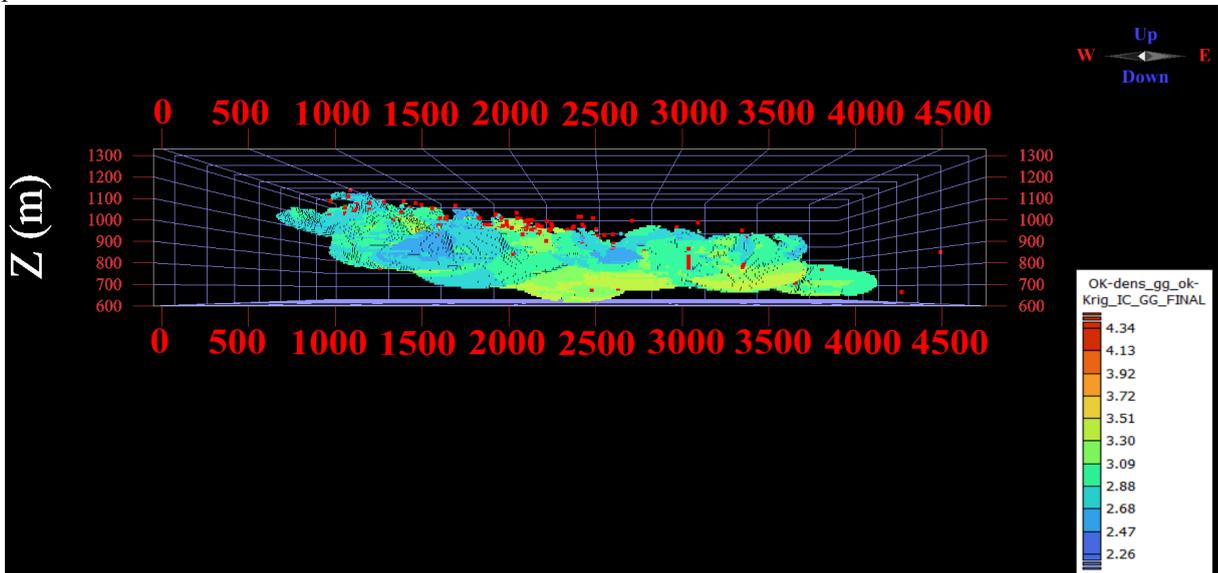
Para esta situação, o volume rochoso é de 357,421,000m³ (trezentos e cinquenta e sete milhões quatrocentos e vinte e um mil metros cúbicos). As Figuras 58 e 59 representam a estimativa vista em planta e em perfil.

Figura 58 - Estimativa de densidade para a litologia IC e método da perfilagem geofísica gama-gama vista em planta.



Fonte: elaborado pelo autor utilizando o *software Isatis.neo*.

Figura 59 - Estimativa de densidade para a litologia IC e método da perfilagem geofísica gama-gama vista em perfil.



Fonte: elaborado pelo autor utilizando o *software Isatis.neo*.

Ensaio direto

A Tabela 29 a seguir apresenta os parâmetros utilizados para a estimativa. Em seguida, a Tabela 30 diz respeito ao sumário estatístico da densidade estimada para a litologia IC e método dos ensaios diretos de laboratório para obtenção da densidade.

Tabela 29 - Parâmetros adotados para a estimativa de densidade da litologia IC e método dos ensaios diretos de laboratório.

Raio U	Raio V	Raio W	Nº de setores angulares	Nº máximo de amostras por setor	Nº máximo de amostras	Nº mínimo de amostras
180	50	45	1	16	16	2

Fonte: autor.

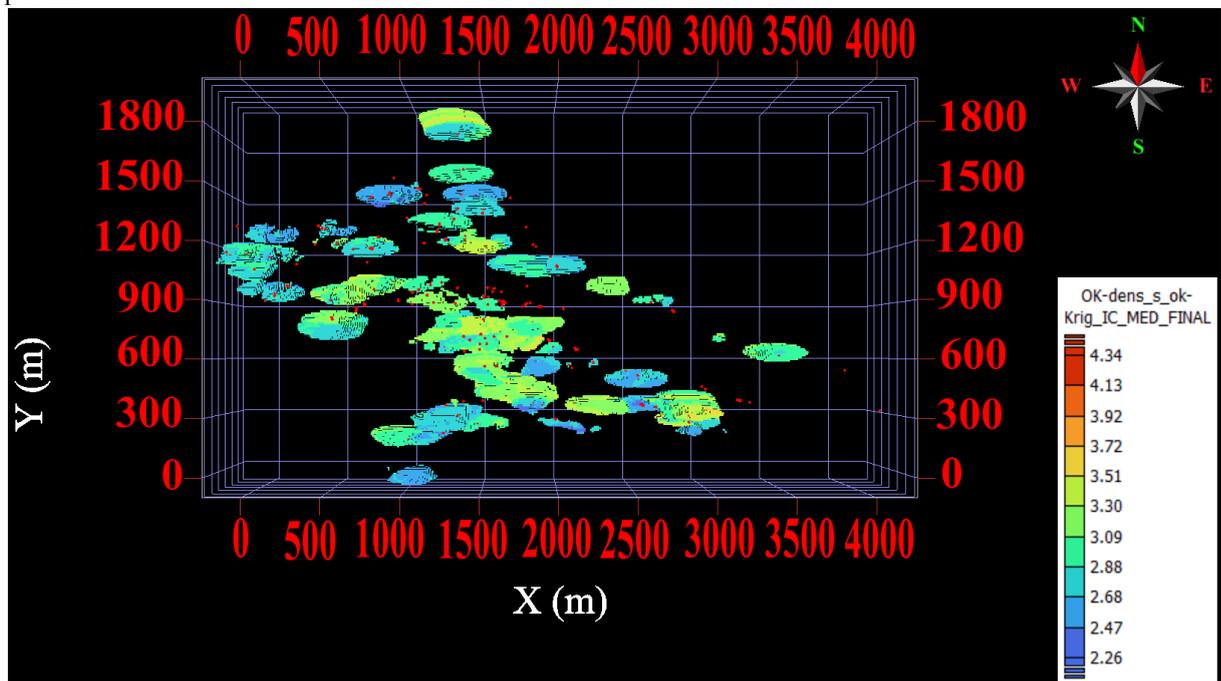
Tabela 30 - Sumário estatístico da densidade estimada a partir da krigagem ordinária para a litologia IC e método dos ensaios diretos de laboratório.

Nº total de blocos	Nº de blocos estimados	Média (ton/m³)	Variância	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
16,005,600	110,468	3.04	0.06168	0.25	2.26	3.68

Fonte: autor.

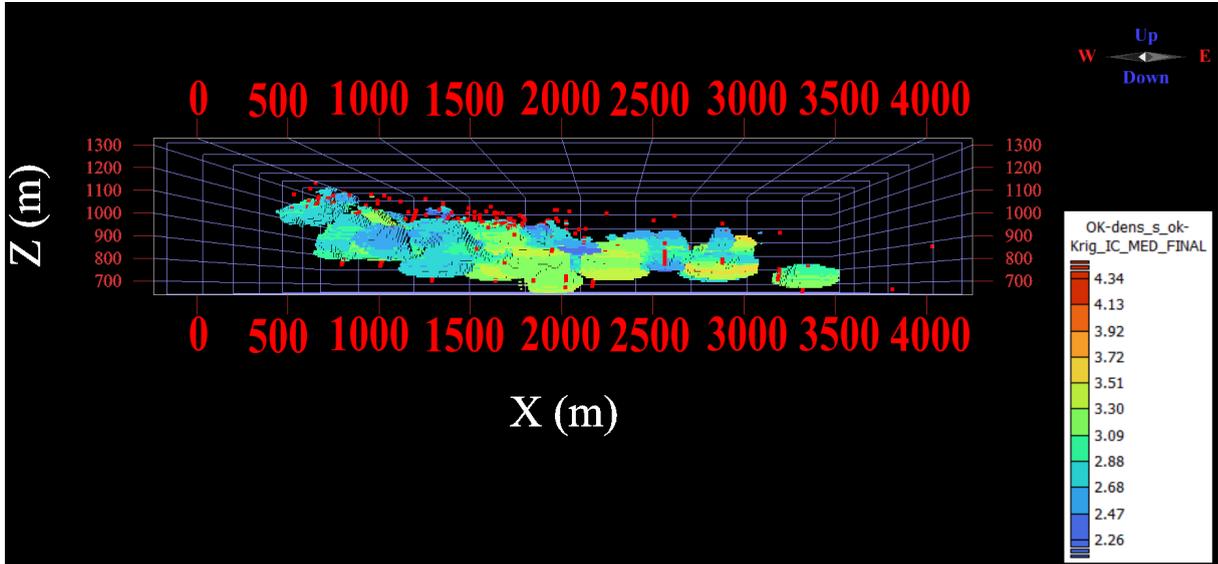
Assim, o volume rochoso estimado foi de 110,468,000m³ (cento e dez milhões e quatrocentos e sessenta e oito mil metros cúbicos). As Figuras 60 e 61 a seguir representam a estimativa vista em planta e em perfil.

Figura 60 - Estimativa de densidade para a litologia IC e método dos ensaios diretos de laboratório vista em planta.



Fonte: elaborado pelo autor utilizando o software *Isatis.neo*.

Figura 61 - Estimativa de densidade para a litologia IC e método dos ensaios diretos de laboratório vista em perfil.



Fonte: elaborado pelo autor utilizando o *software Isatis.neo*.

IF

CNM

A Tabela 31 apresenta os parâmetros utilizados para a realização das estimativas. Em seguida está a Tabela 32, que diz respeito ao sumário estatístico da variável densidade que foi estimada a partir da krigagem ordinária, para a litologia IF e método CNM.

Tabela 31 - Parâmetros adotados para a estimativa de densidade da litologia IF e método CNM.

Raio U	Raio V	Raio W	Nº de setores angulares	Nº máximo de amostras por setor	Nº máximo de amostras	Nº mínimo de amostras
265	210	170	1	16	16	4

Fonte: autor.

Tabela 32 - Sumário estatístico da densidade estimada a partir da krigagem ordinária para a litologia IF e método do CNM.

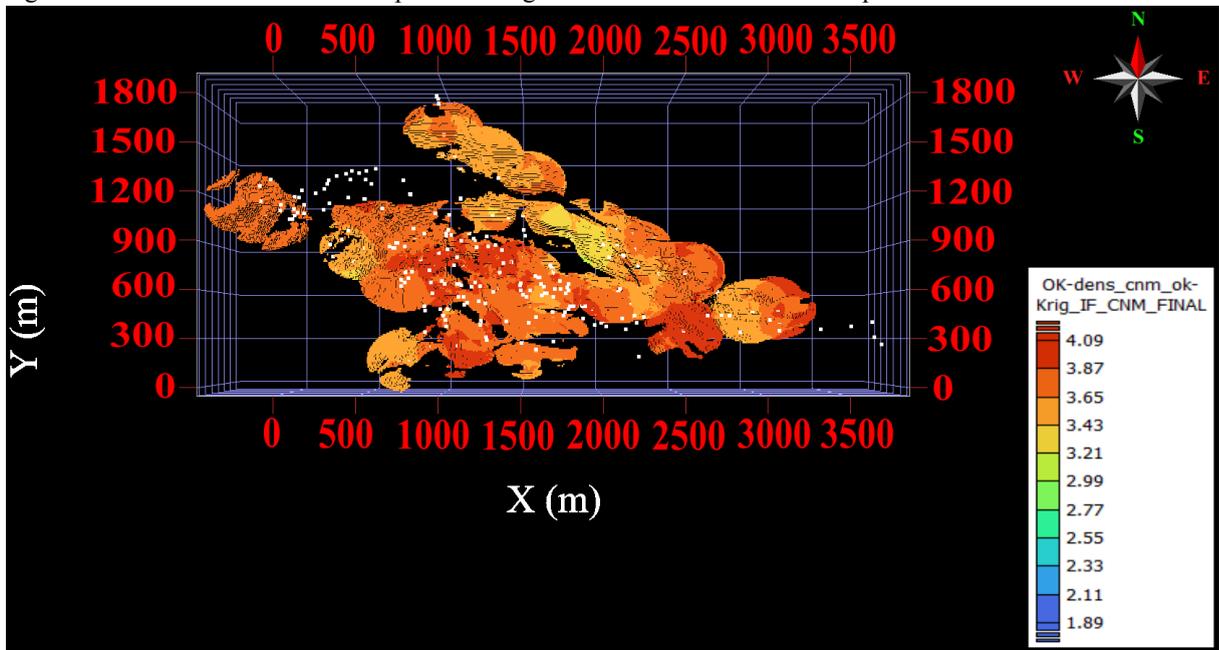
Nº total de blocos	Nº de blocos estimados	Média (ton/m³)	Variância	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
16,005,600	262,788	3.69	0.02143	0.15	3.10	4.09

Fonte: autor.

Para a litologia IF e método CNM o volume de rocha estimado foi de 262,788,000m³ (duzentos e sessenta e dois milhões e setecentos e oitenta e oito mil metros cúbicos). As

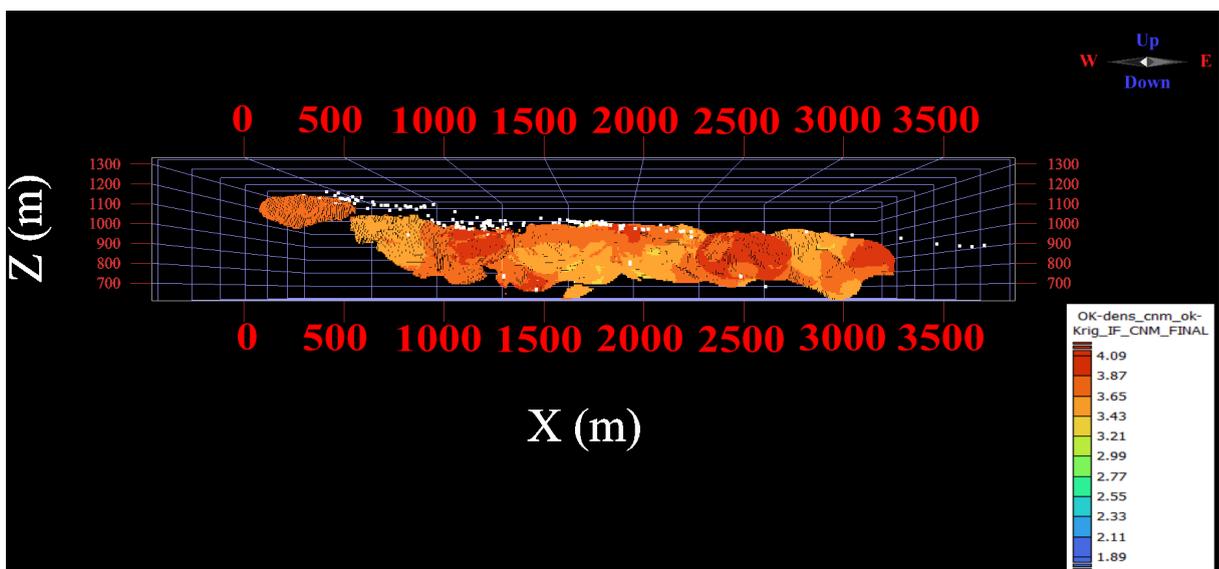
Figuras 62 e 63 apresentadas a seguir dizem respeito à vista em planta e em perfil da estimativa.

Figura 62 - Estimativa de densidade para a litologia IF e método CNM vista em planta.



Fonte: elaborado pelo autor utilizando o *software Isatis.neo*.

Figura 63 - Estimativa de densidade para a litologia IF e método CNM vista em perfil.



Fonte: elaborado pelo autor utilizando o *software Isatis.neo*.

Gama-gama

A Tabela 33 exhibe os parâmetros adotados para realizar a estimativa. Já a Tabela 34 apresenta o sumário estatístico da variável densidade estimada a partir da krigagem ordinária para a litologia IF e método da perfilação geofísica gama-gama.

Tabela 33 - Parâmetros adotados para a estimativa de densidade da litologia IF e método da perfilação geofísica gama-gama.

Raio U	Raio V	Raio W	Nº de setores angulares	Nº máximo de amostras por setor	Nº máximo de amostras	Nº mínimo de amostras
380	195	75	1	16	16	3

Fonte: autor.

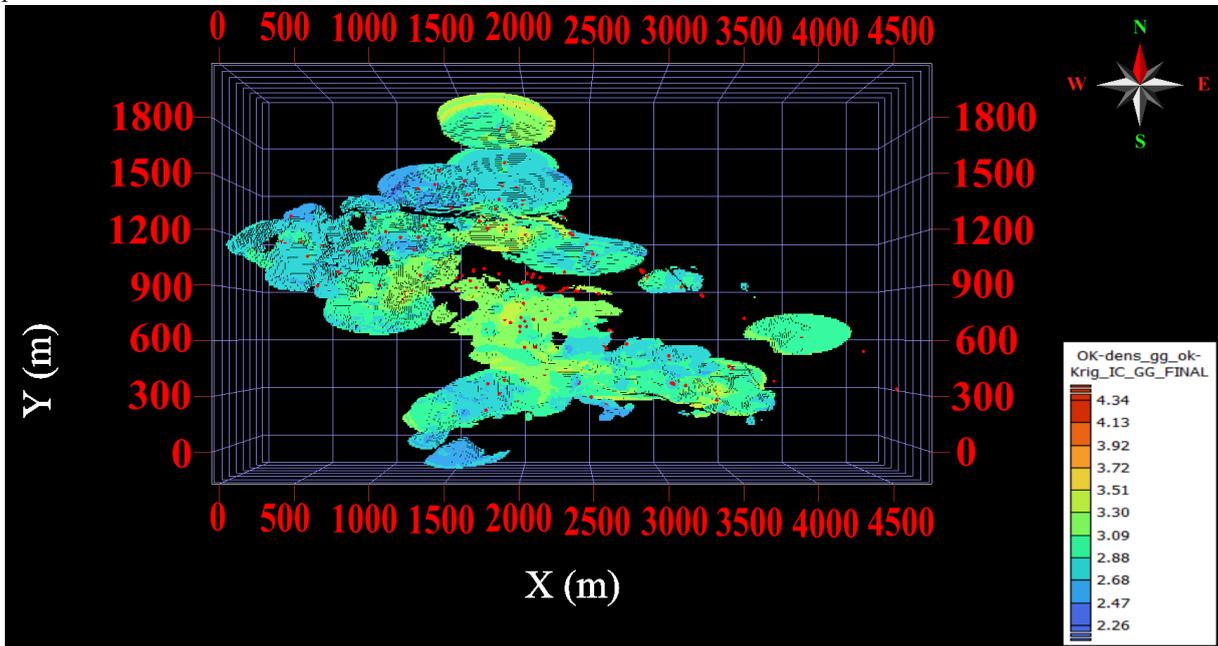
Tabela 34 - Sumário estatístico da densidade estimada a partir da krigagem ordinária para a litologia IF e método da perfilação geofísica gama-gama.

Nº total de blocos	Nº de blocos estimados	Média (ton/m ³)	Variância	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
16,005,600	278,127	2.68	0.04868	0.22	1.99	3.54

Fonte: autor.

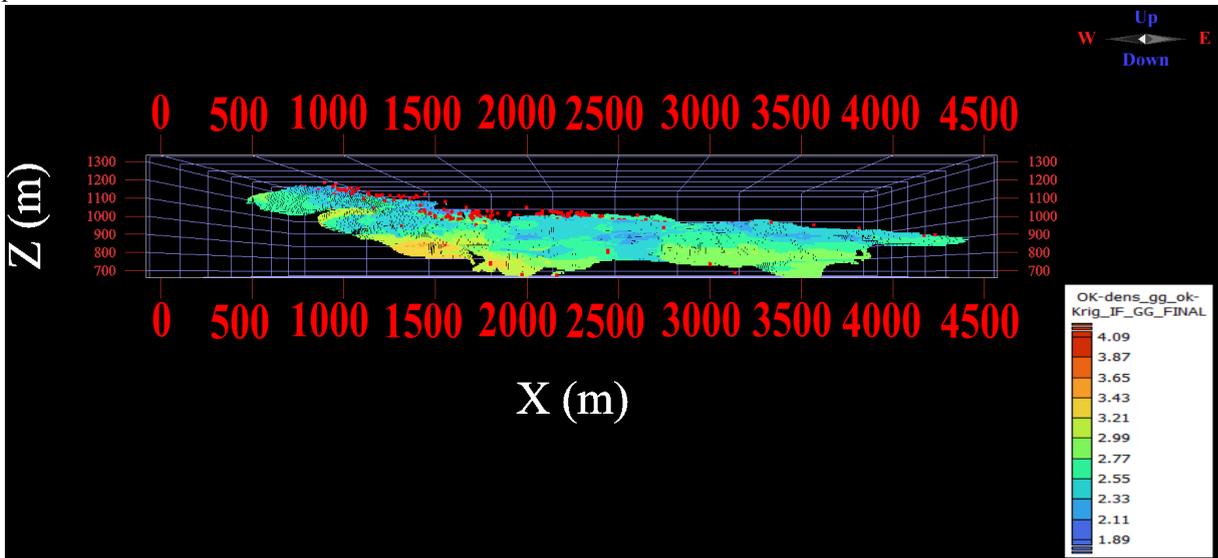
Para a estimativa acima, o volume de rocha ficou estimado em 278,127,000m³ (duzentos e setenta e oito milhões e cento e vinte e sete mil metros cúbicos). As Figuras 64 e 65 a seguir representam as estimativas vistas em planta e em perfil.

Figura 64 - Estimativa de densidade para a litologia IF e método da perfilação geofísica gama-gama vista em planta.



Fonte: elaborado pelo autor utilizando o *software Isatis.neo*.

Figura 65 - Estimativa de densidade para a litologia IF e método da perfilação geofísica gama-gama vista em perfil.



Fonte: elaborado pelo autor utilizando o *software Isatis.neo*.

Ensaio direto

A Tabela 35 apresenta os parâmetros utilizados para a estimativa produzida para o método dos ensaios diretos de laboratório e litologia IF. Já o sumário estatístico da estimativa da densidade está apresentado na Tabela 36 a seguir.

Tabela 35 - Parâmetros adotados para a estimativa de densidade da litologia IF e método dos ensaios diretos de laboratório.

Raio U	Raio V	Raio W	Nº de setores angulares	Nº máximo de amostras por setor	Nº máximo de amostras	Nº mínimo de amostras
375	250	70	1	16	16	2

Fonte: autor.

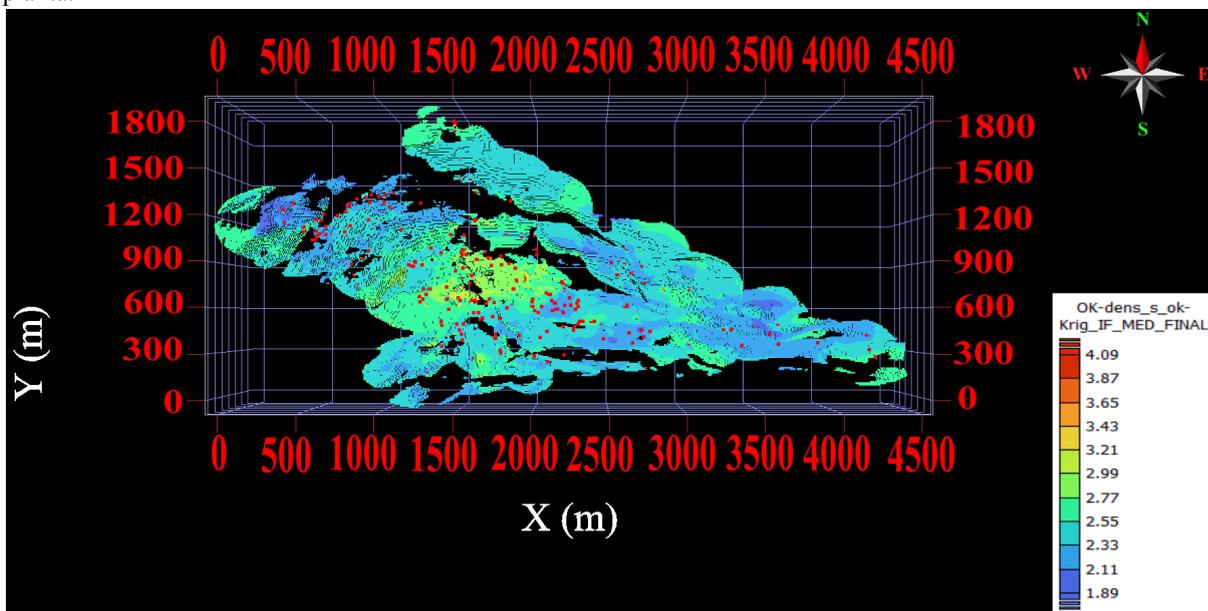
Tabela 36 - Sumário estatístico da densidade estimada a partir da krigagem ordinária para a litologia IF e método dos ensaios diretos de laboratório.

Nº total de blocos	Nº de blocos estimados	Média (ton/m ³)	Variância	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
16,005,600	311,076	2.56	0.04089	0.20	1.89	3.46

Fonte: autor.

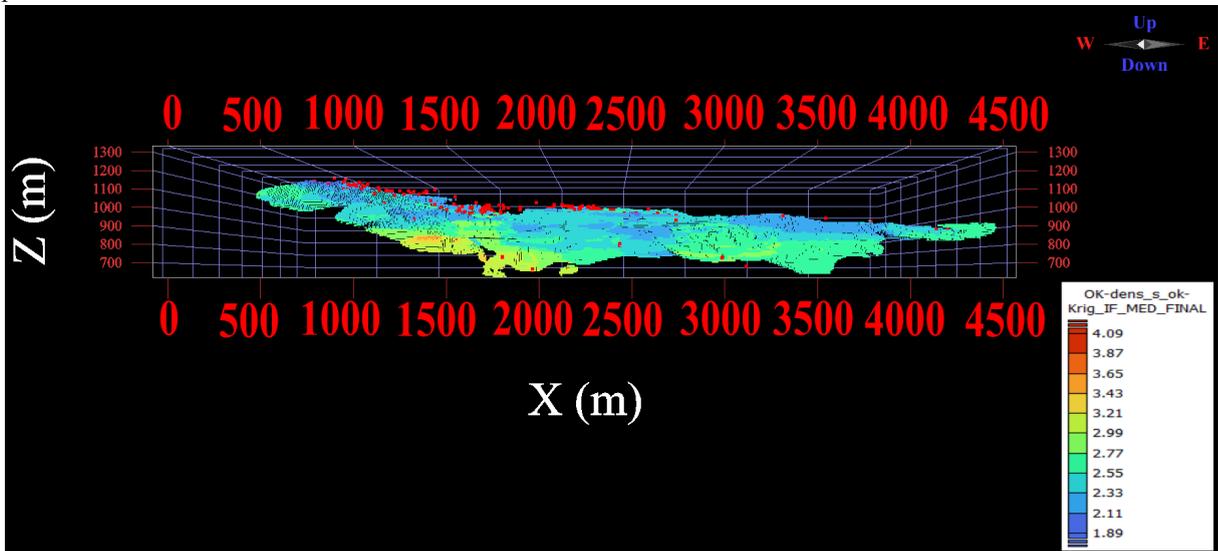
Para o método dos ensaios diretos de laboratório o volume de rocha estimado foi de 311,076,000m³ (trezentos e onze milhões e setenta e seis mil metros cúbicos). As Figuras 66 e 67 a seguir representam a vista em planta e em perfil da estimativa.

Figura 66 - Estimativa de densidade para a litologia IF e método dos ensaios diretos de laboratório vista em planta.



Fonte: elaborado pelo autor utilizando o software *Isatis.neo*.

Figura 67 - Estimativa de densidade para a litologia IF e método dos ensaios diretos de laboratório vista em perfil.



Fonte: elaborado pelo autor utilizando o *software Isatis.neo*.

IFR

CNM

Os parâmetros utilizados para realizar a estimativa para a litologia IFR e método CNM estão apresentados na Tabela 37. No que diz respeito ao sumário estatístico da densidade estimada a partir da krigagem ordinária está apresentado na Tabela 38 abaixo.

Tabela 37 - Parâmetros adotados para a estimativa de densidade da litologia IFR e método CNM.

Raio U	Raio V	Raio W	Nº de setores angulares	Nº máximo de amostras por setor	Nº máximo de amostras	Nº mínimo de amostras
460	200	70	1	16	16	2

Fonte: autor.

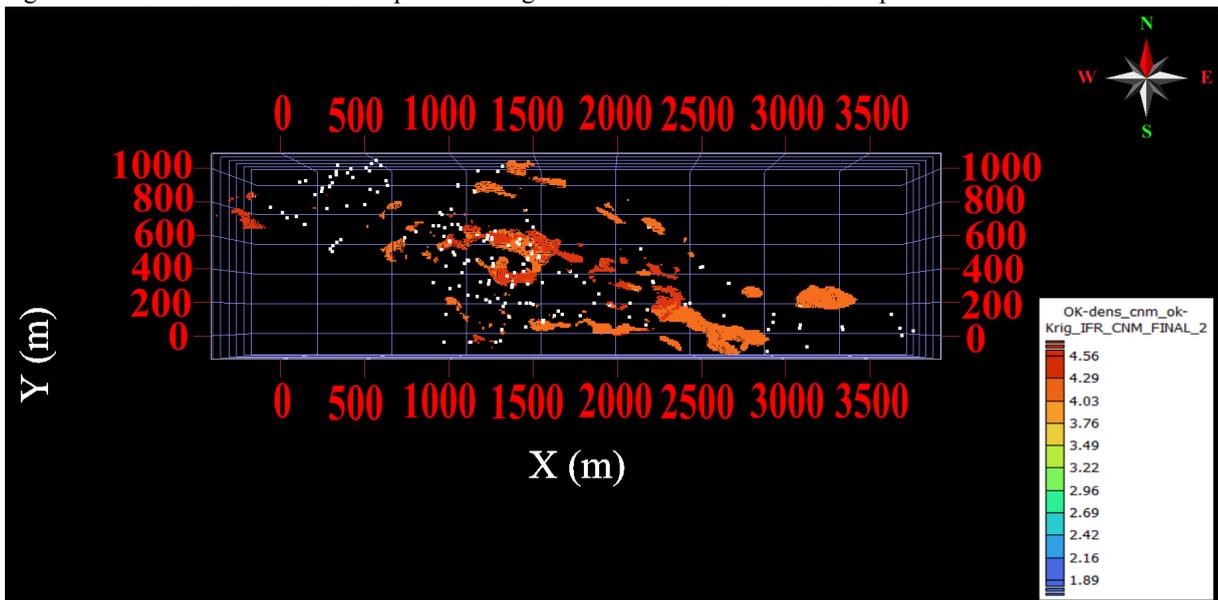
Tabela 38 - Sumário estatístico da densidade estimada a partir da krigagem ordinária para a litologia IFR e método CNM.

Nº total de blocos	Nº de blocos estimados	Média (ton/m ³)	Variância	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
16,005,600	17,281	4.25	0.006324	0.08	4.07	4.56

Fonte: autor.

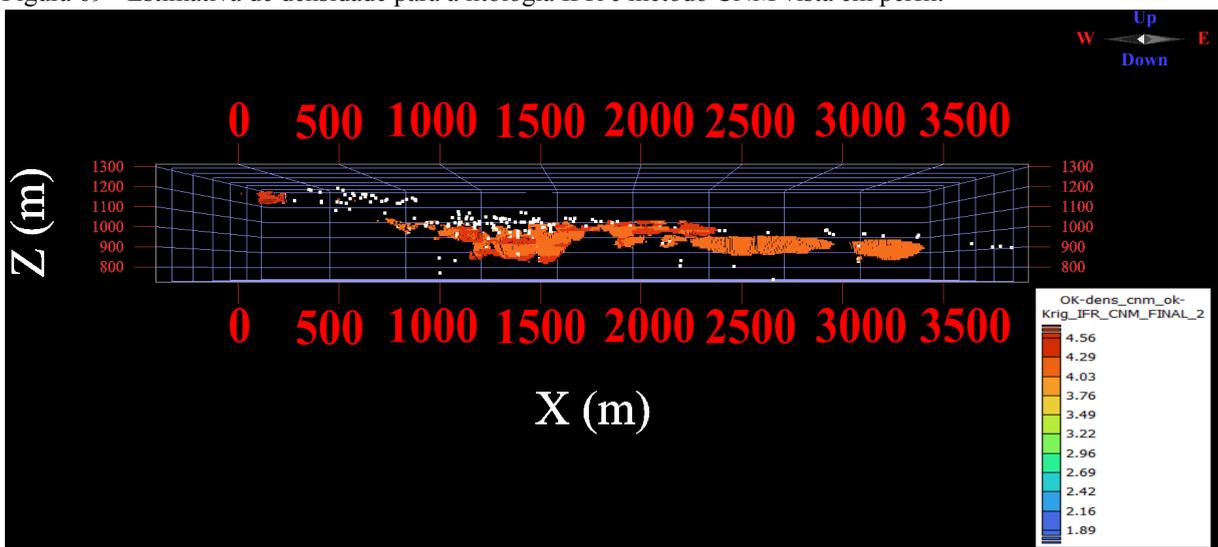
Para a litologia IFR e método CNM o volume de rocha estimado foi de 17,281,000m³ (dezesete milhões e duzentos e oitenta e um mil metros cúbicos). As Figuras 68 e 69 abaixo representam a estimativa vista em planta e em perfil.

Figura 68 - Estimativa de densidade para a litologia IFR e método CNM vista em planta.



Fonte: elaborado pelo autor utilizando o *software Isatis.neo*.

Figura 69 - Estimativa de densidade para a litologia IFR e método CNM vista em perfil.



Fonte: elaborado pelo autor utilizando o *software Isatis.neo*.

Gama-gama

Os parâmetros utilizados para a estimativa da litologia IFR e método da perfilagem geofísica gama-gama estão apresentados na Tabela 39, já o sumário estatístico da variável densidade estimada está apresentado na Tabela 40 a seguir.

Tabela 39 - Parâmetros adotados para a estimativa de densidade da litologia IFR e método da perfilagem geofísica gama-gama.

Raio U	Raio V	Raio W	Nº de setores angulares	Nº máximo de amostras por setor	Nº máximo de amostras	Nº mínimo de amostras
340	170	45	1	16	16	4

Fonte: autor.

Tabela 40 - Sumário estatístico da densidade estimada a partir da krigagem ordinária para a litologia IFR e método da perfilagem geofísica gama-gama.

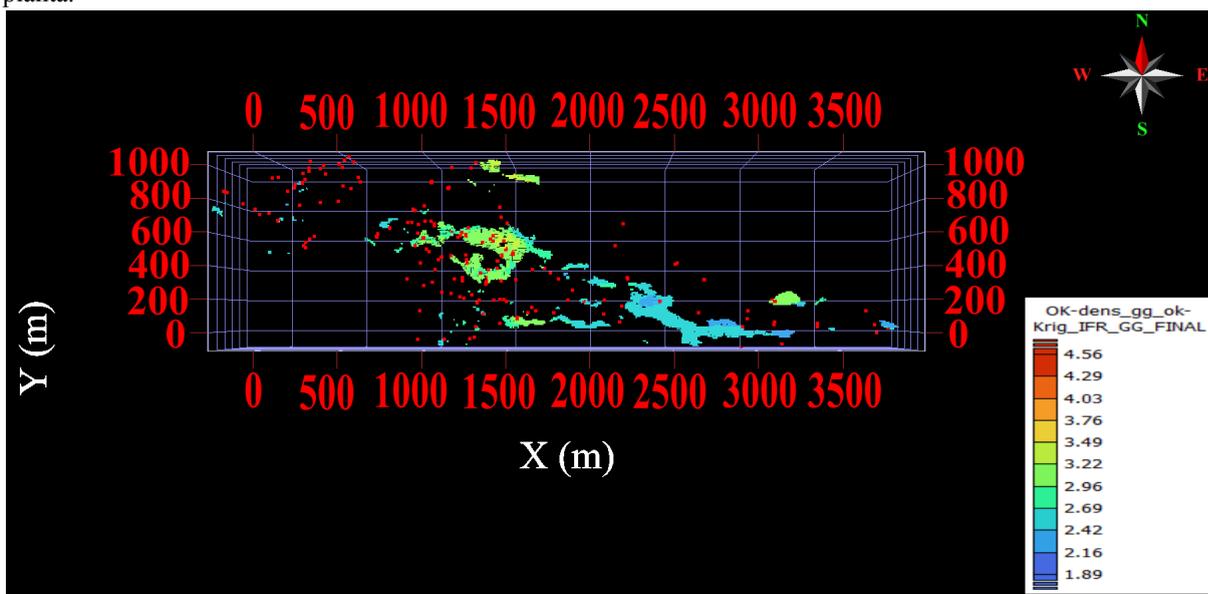
Nº total de blocos	Nº de blocos estimados	Média (ton/m ³)	Variância	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
16,005,600	10,681	2.90	0.07961	0.28	2.28	3.40

Fonte: autor.

Assim, o volume de rocha estimado para a litologia IFR e método da perfilagem geofísica gama-gama é de 10,681,000m³ (dez milhões e seiscentos e oitenta e um mil metros cúbicos).

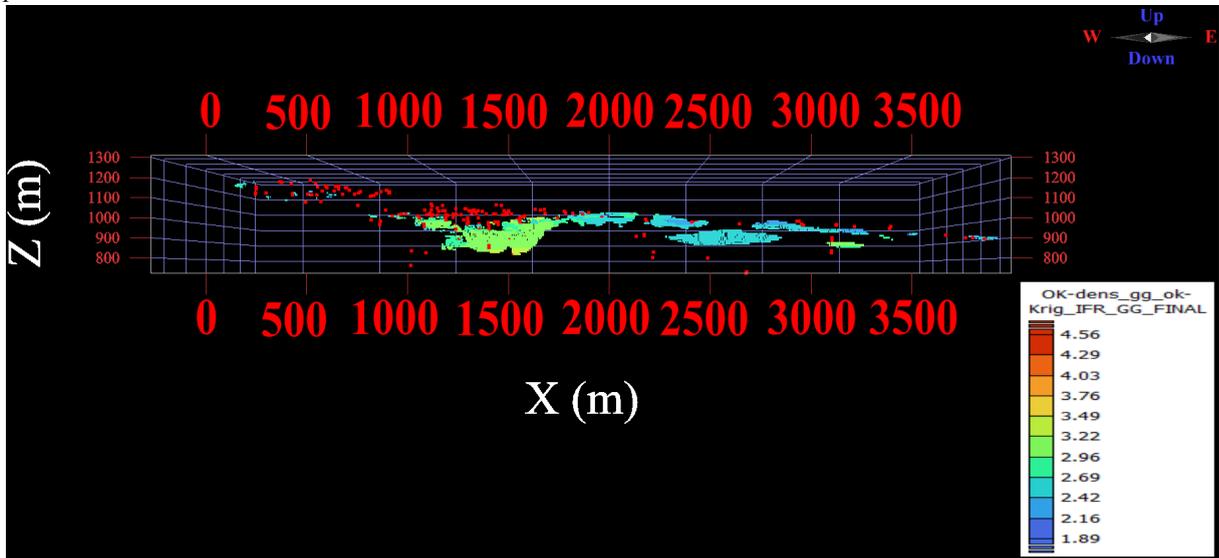
As Figuras 70 e 71 representam a vista em planta e em perfil da estimativa produzida.

Figura 70 - Estimativa de densidade para a litologia IFR e método da perfilagem geofísica gama-gama vista em planta.



Fonte: elaborado pelo autor utilizando o software *Isatis.neo*.

Figura 71 - Estimativa de densidade para a litologia IFR e método da perfilagem geofísica gama-gama vista em perfil.



Fonte: elaborado pelo autor utilizando o software *Isatis.neo*.

Ensaaios diretos

A Tabela 41 a seguir apresenta os parâmetros utilizados para a estimativa. Quanto ao sumário estatístico da estimativa realizada para a variável densidade no método dos ensaios diretos de laboratório e litologia IFR, está apresentado na Tabela 42 abaixo.

Tabela 41 - Parâmetros adotados para a estimativa de densidade da litologia IFR e método dos ensaios diretos de laboratório.

Raio U	Raio V	Raio W	Nº de setores angulares	Nº máximo de amostras por setor	Nº máximo de amostras	Nº mínimo de amostras
475	275	90	1	16	16	3

Fonte: autor.

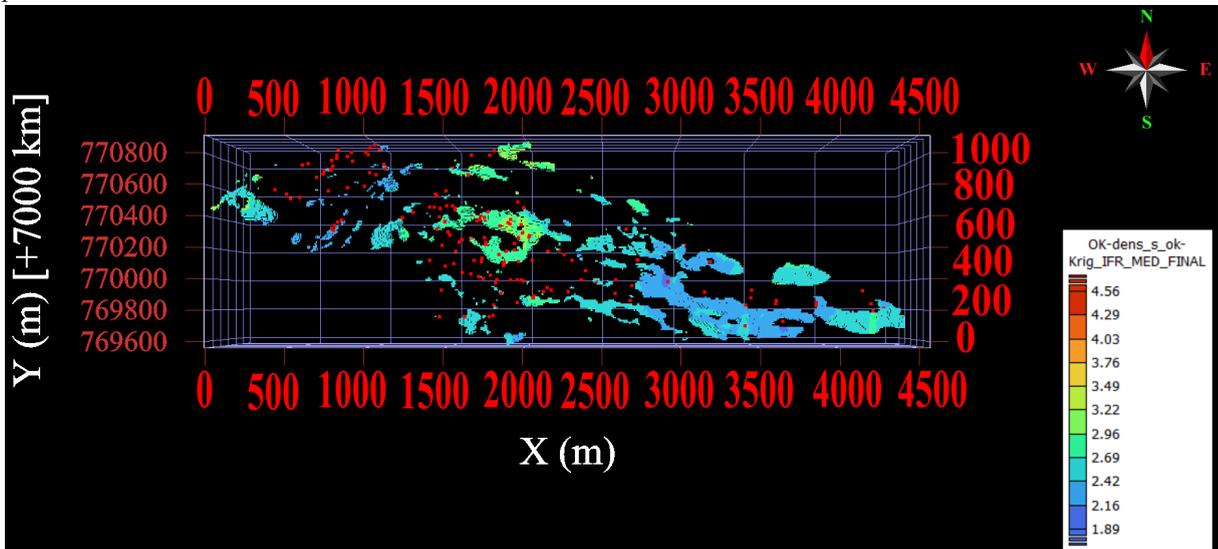
Tabela 42 - Sumário estatístico da densidade estimada a partir da krigagem ordinária para a litologia IFR e método dos ensaios diretos de laboratório.

Nº total de blocos	Nº de blocos estimados	Média (ton/m³)	Variância	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
16,005,600	30,512	2.62	0.05698	0.24	1.89	3.31

Fonte: autor.

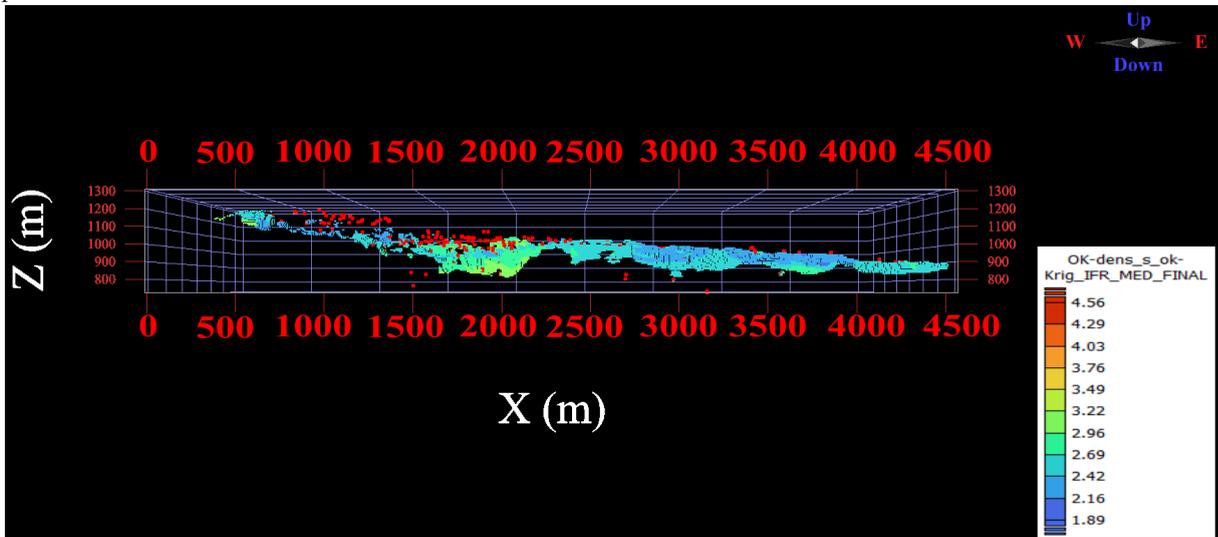
Para o método de ensaios diretos de laboratório e litologia IFR o volume de rocha estimado foi de 30,512,000m³ (trinta milhões e quinhentos e doze mil metros cúbicos). As Figuras 72 e 73 abaixo representam a vista em planta e em perfil da estimativa.

Figura 72 - Estimativa de densidade para a litologia IFR e método dos ensaios diretos de laboratório vista em planta.



Fonte: elaborado pelo autor utilizando o *software Isatis.neo*.

Figura 73 - Estimativa de densidade para a litologia IFR e método dos ensaios diretos de laboratório vista em perfil.



Fonte: elaborado pelo autor utilizando o *software Isatis.neo*.

4.4 Validação cruzada

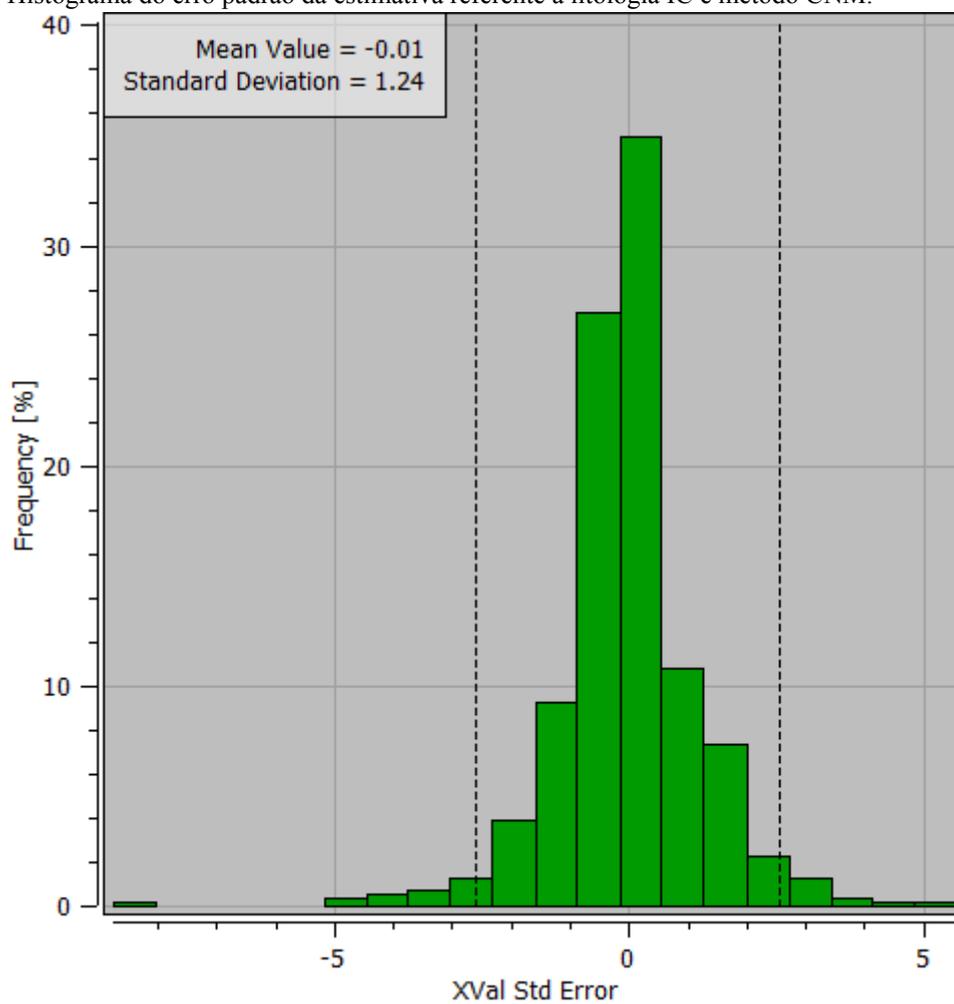
Após realizar as estimativas é preciso validar as mesmas através de uma técnica chamada de validação cruzada. Foram realizadas validações cruzadas para cada uma das estimativas produzidas. A seguir serão apresentados o histograma do erro padrão, *scatterplot* (valor observado *versus* valor estimado) e gráfico valor estimado *versus* erro padrão, gerados no processo de validação cruzada.

IC

CNM

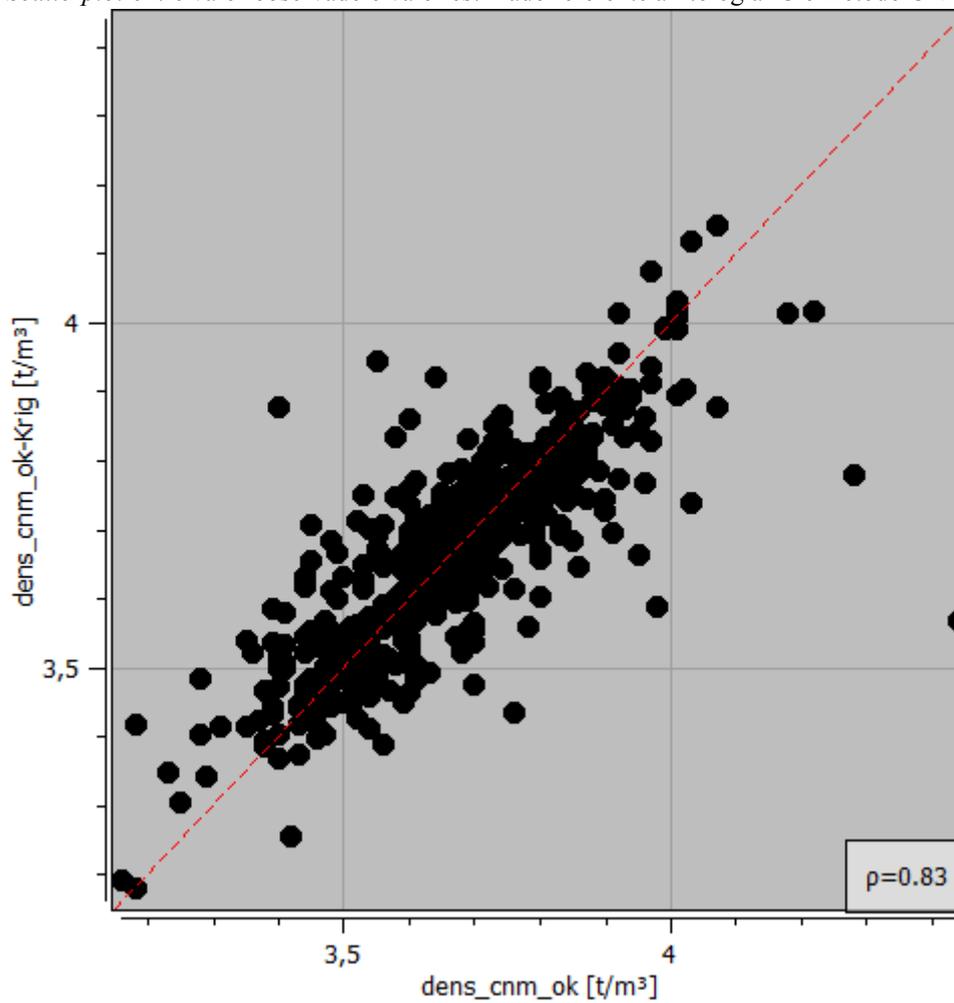
As Figuras 74, 75 e 76 apresentadas a seguir representam o histograma do erro dos valores estimados, o *scatterplot* entre valor observado e valor estimado, além do gráfico entre valor estimado e erro padrão.

Figura 74 - Histograma do erro padrão da estimativa referente à litologia IC e método CNM.



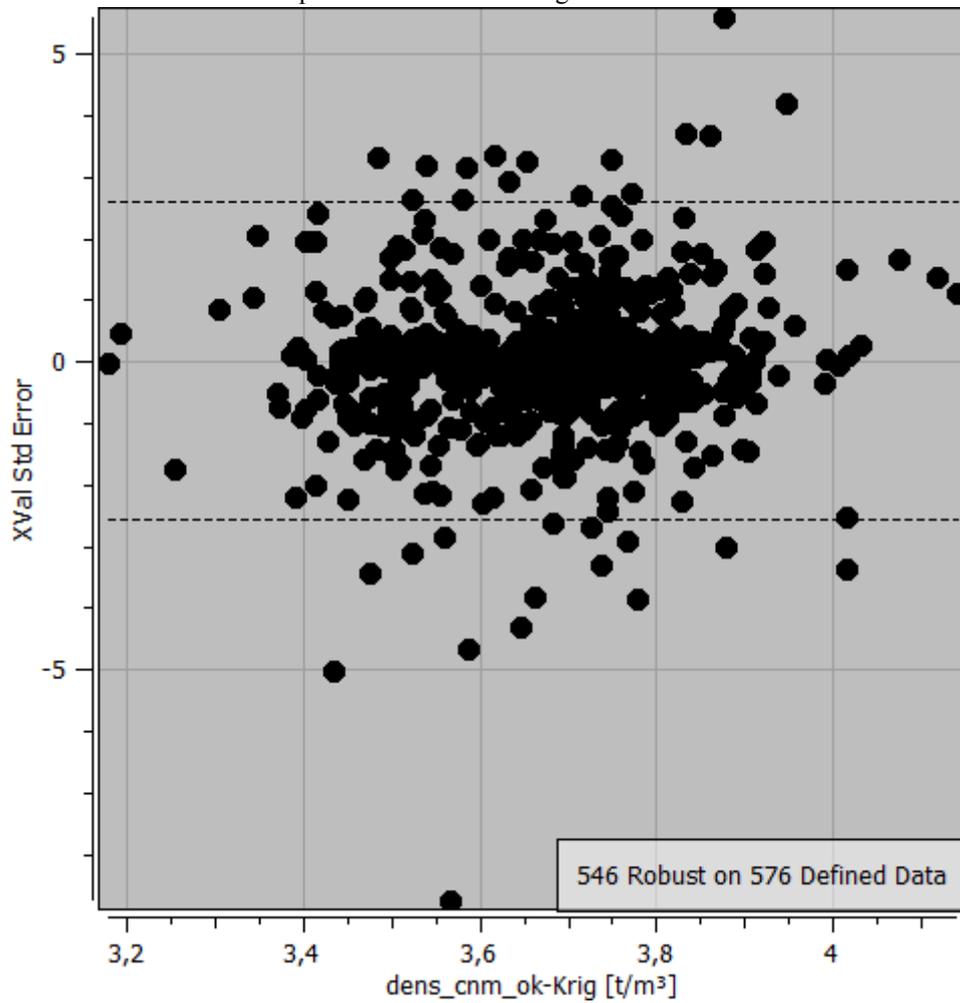
Fonte: elaborado pelo autor utilizando o *software Isatis.neo*.

Figura 75 - Scatterplot entre valor observado e valor estimado referente à litologia IC e método CNM.



Fonte: elaborado pelo autor utilizando o *software Isatis.neo*.

Figura 76 - Valor estimado versus erro padrão referente à litologia IC e método CNM.

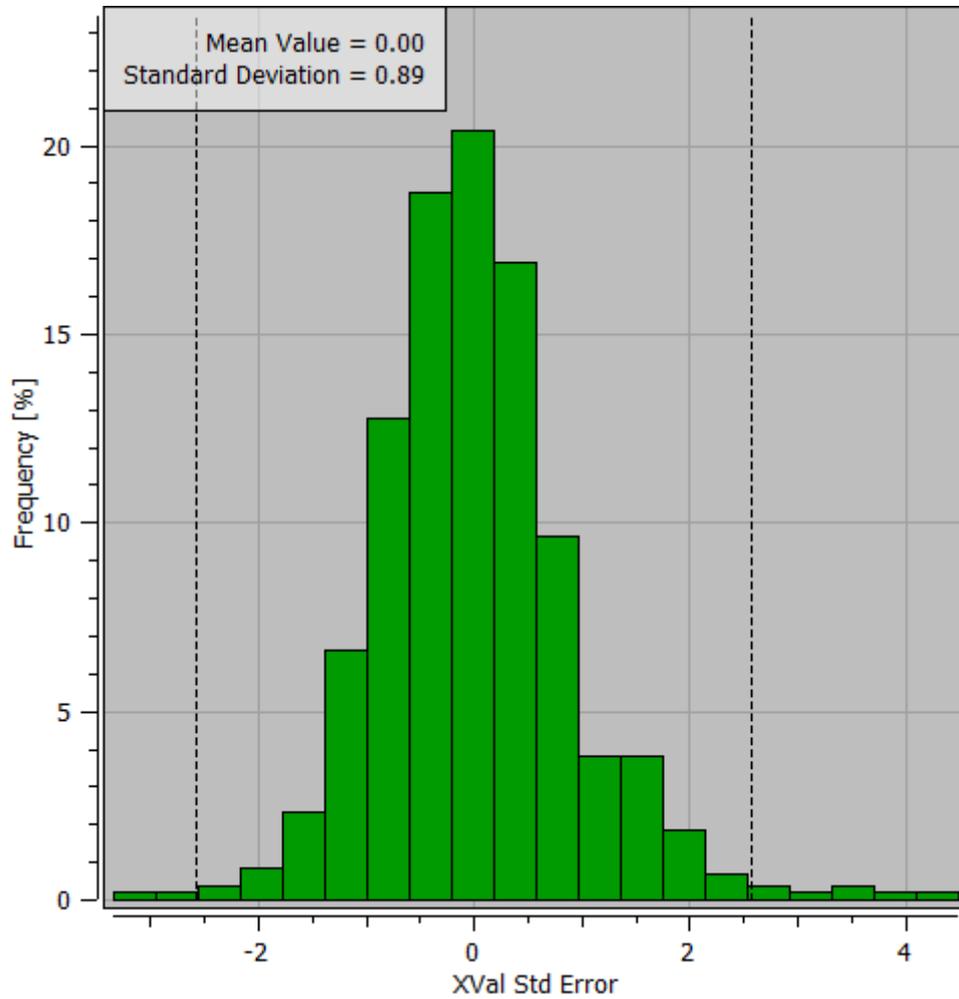


Fonte: elaborado pelo autor utilizando o *software Isatis.neo*.

A partir do histograma é possível observar que a média do erro padrão foi de -0.01 e o desvio padrão do erro foi de 1.24, além do mais o *scatterplot* evidencia a existência de uma correlação linear entre o valor observado e o valor estimado, uma vez que o coeficiente de correlação linear foi de 0.83. O gráfico produzido entre valor estimado e erro padrão permite dizer que dos 576 dados definidos, 546 amostras se encontram dentro do erro padrão.

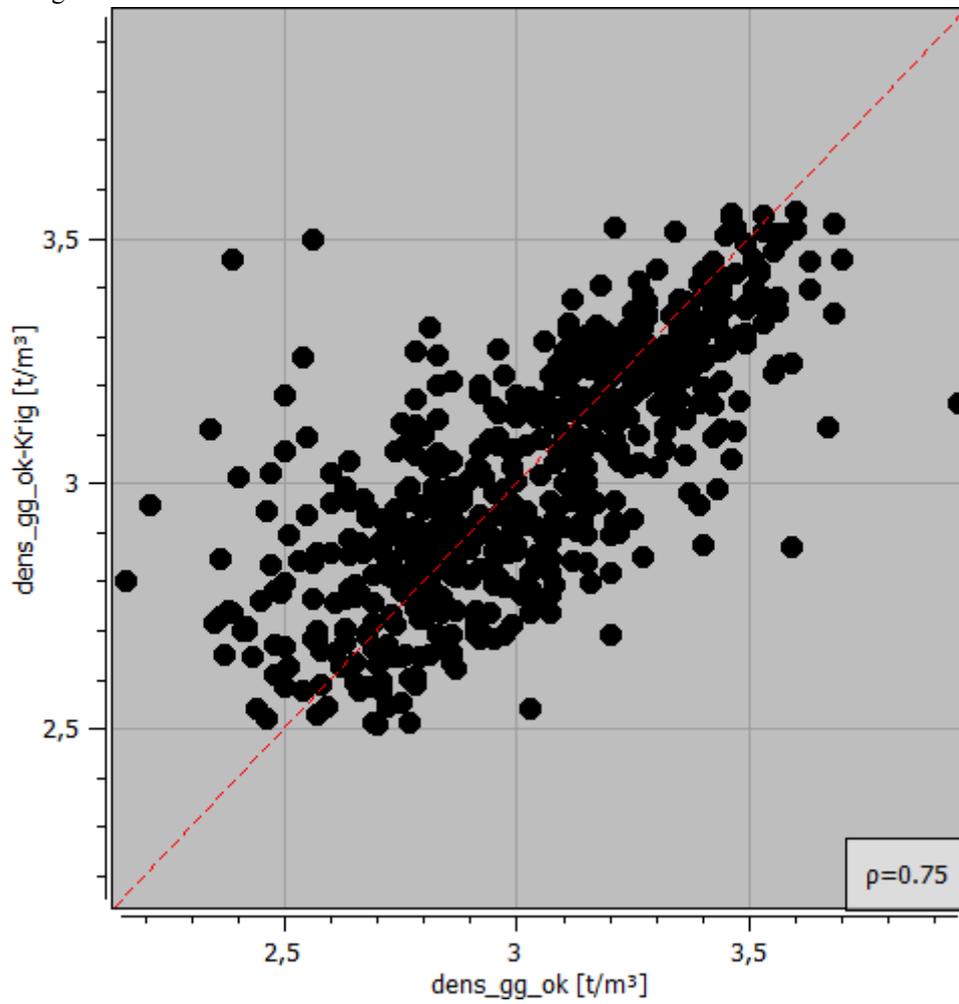
Gama-gama

Figura 77 - Histograma do erro padrão da estimativa referente à litologia IC e método da perfilagem geofísica gama-gama.



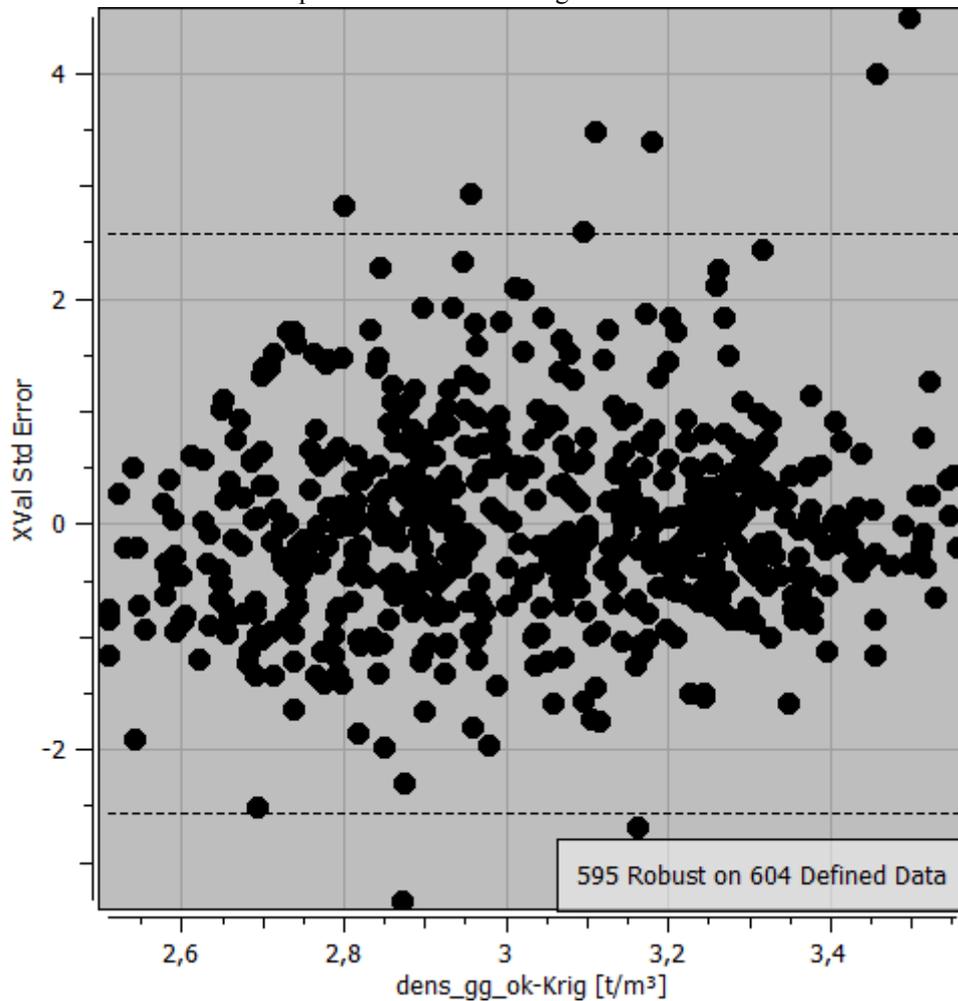
Fonte: elaborado pelo autor utilizando o *software Isatis.neo*.

Figura 78 - Scatterplot entre valor observado e valor estimado referente à litologia IC e método da perfilagem geofísica gama-gama.



Fonte: elaborado pelo autor utilizando o software *Isatis.neo*.

Figura 79 - Valor estimado *versus* erro padrão referente à litologia IC e método CNM.

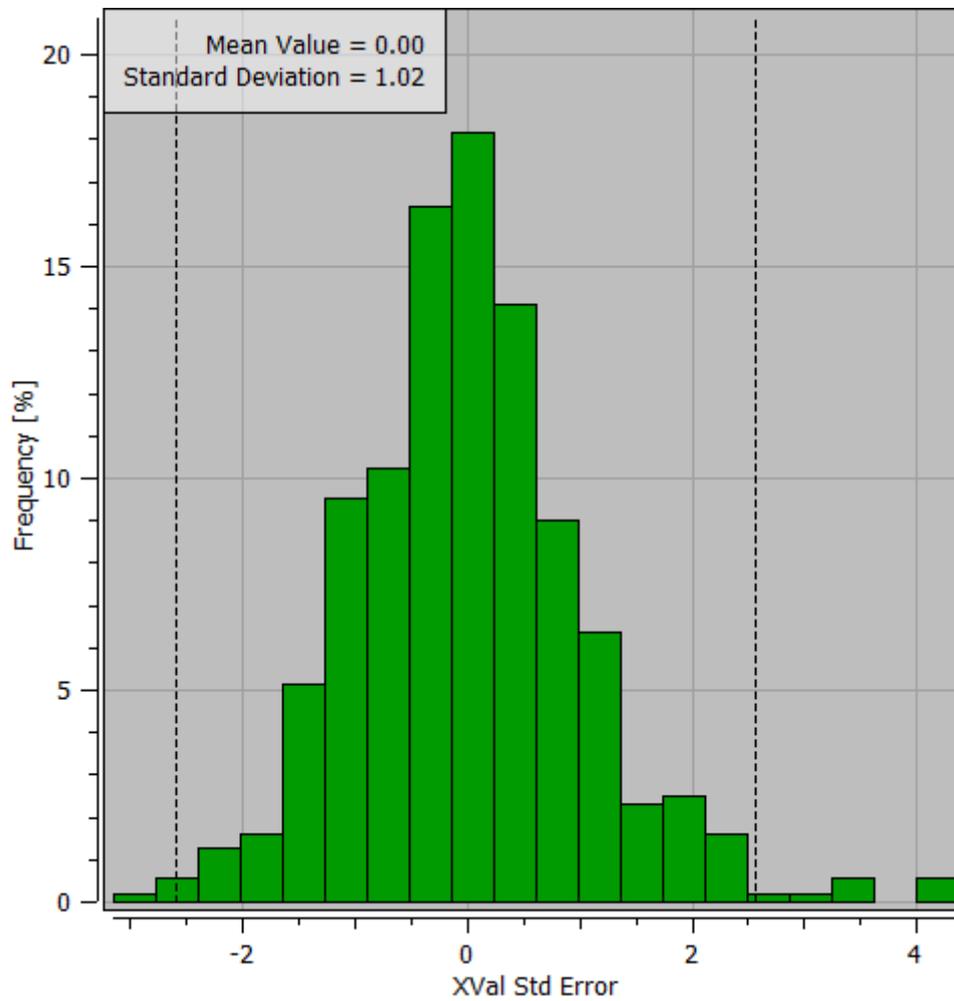


Fonte: elaborado pelo autor utilizando o *software Isatis.neo*.

Com os gráficos gerados no processo de validação cruzada podemos observar que a média do erro padrão da estimativa foi 0.00, o desvio padrão foi 0.89, existe uma correlação linear entre valor observado e valor estimado, uma vez que o coeficiente de correlação linear foi de 0.75 e dos 604 dados definidos, 595 se encontram dentro do erro padrão da estimativa.

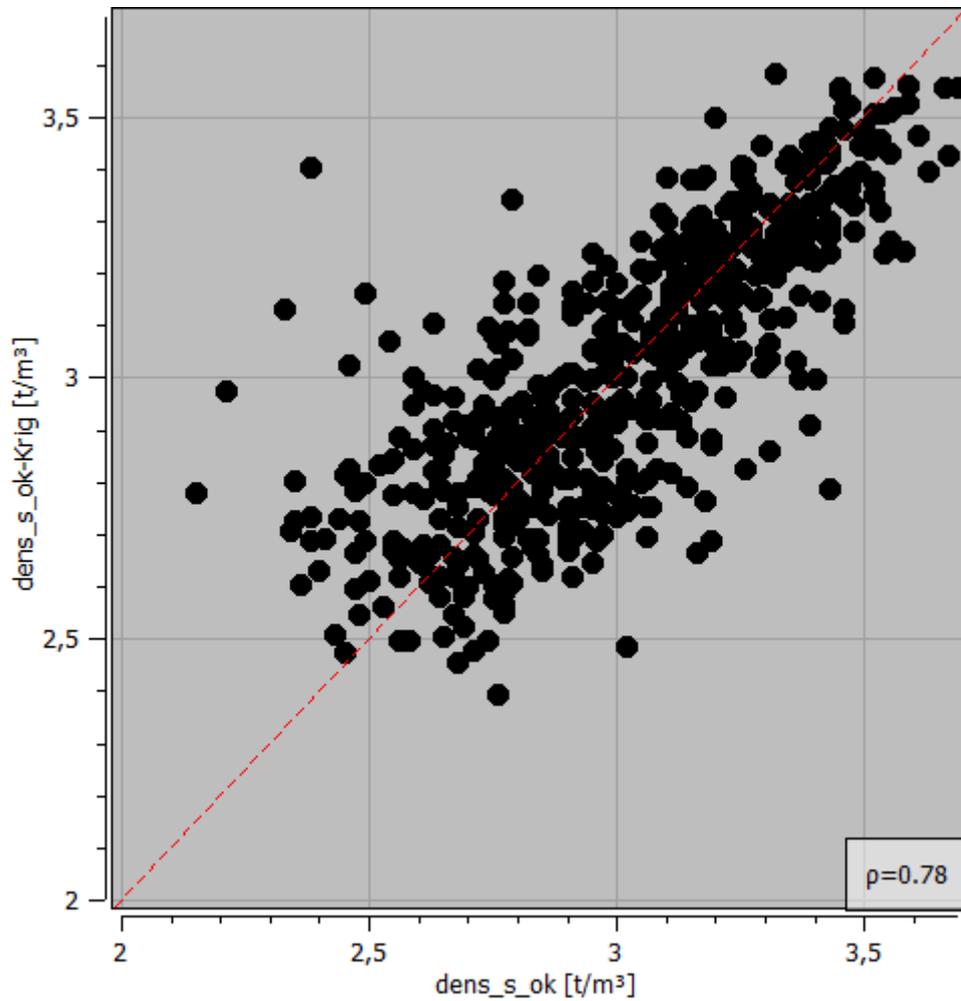
Ensaio diretos

Figura 80 - Histograma do erro padrão da estimativa referente à litologia IC e método dos ensaios diretos de laboratório.



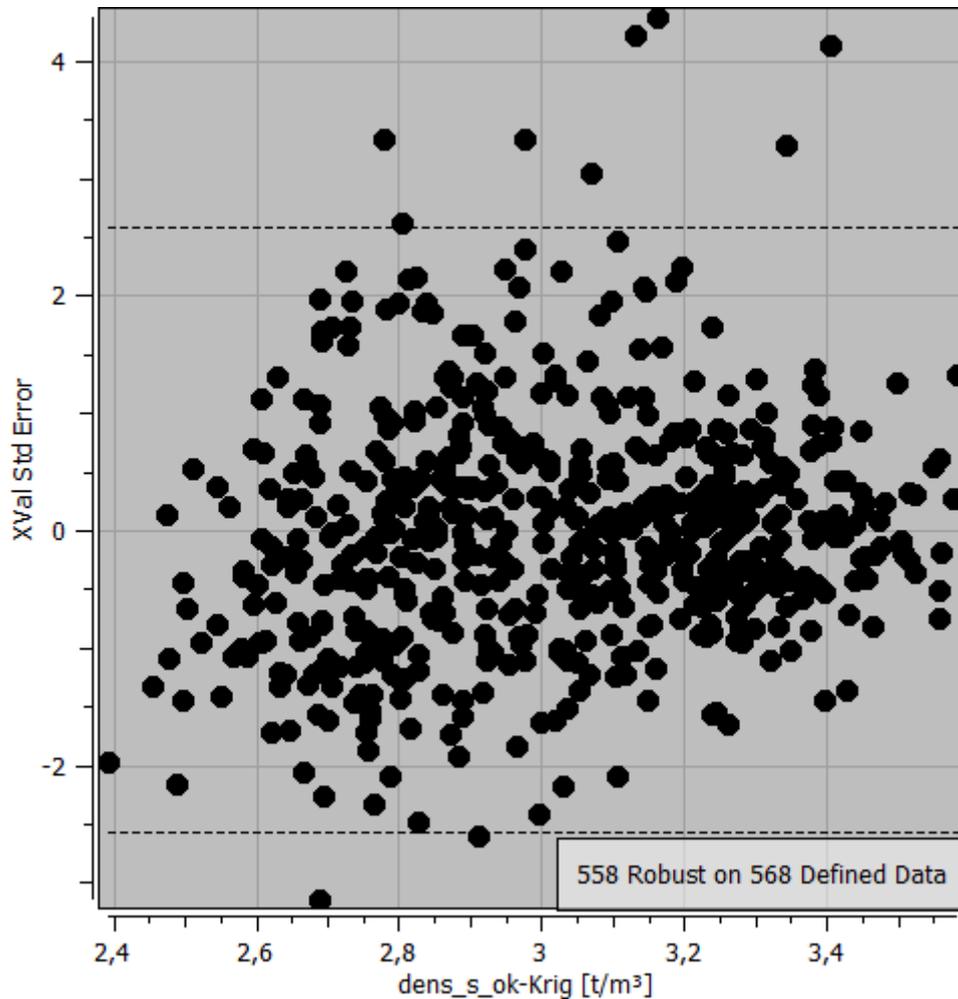
Fonte: elaborado pelo autor utilizando o *software Isatis.neo*.

Figura 81 - *Scatterplot* entre valor observado e valor estimado referente à litologia IC e método dos ensaios diretos de laboratório.



Fonte: elaborado pelo autor utilizando o *software Isatis.neo*.

Figura 82 - Valor estimado *versus* erro padrão referente à litologia IC e método dos ensaios diretos de laboratório.



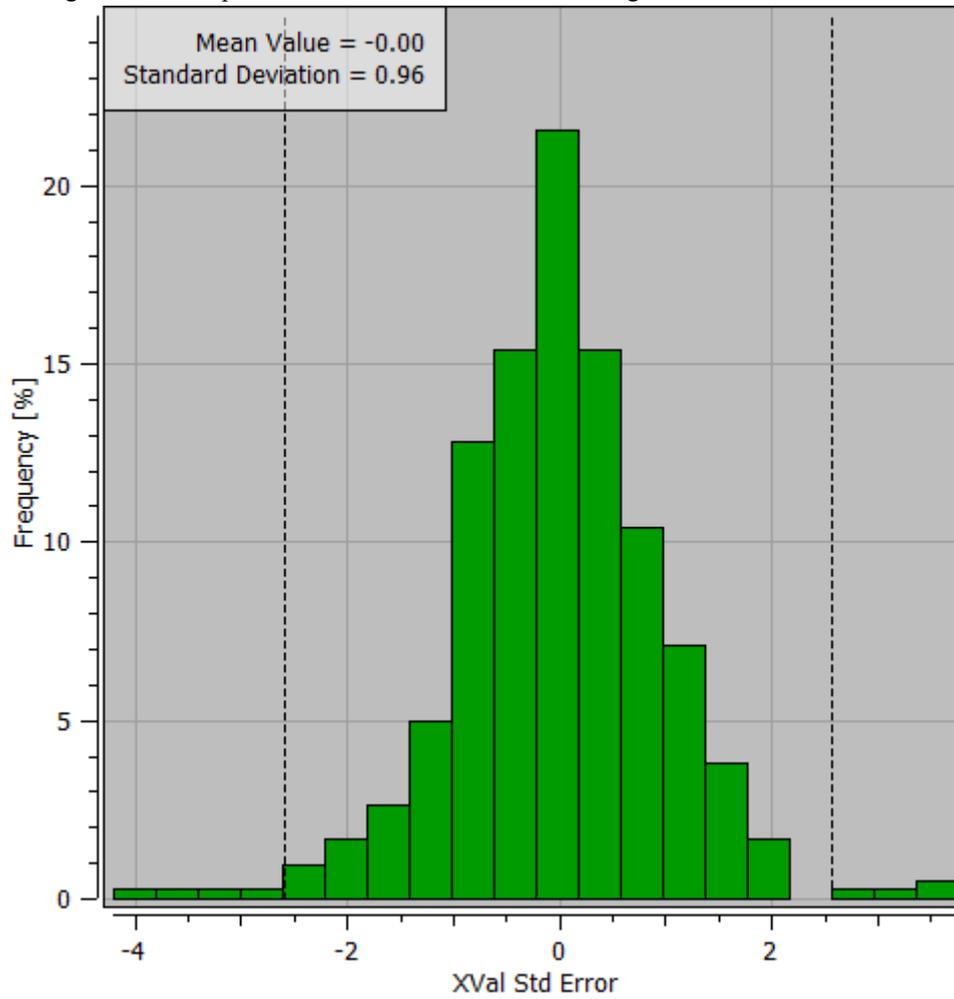
Fonte: elaborado pelo autor utilizando o *software Isatis.neo*.

Para a estimativa dos ensaios diretos de laboratório a média do erro padrão foi 0.00 e desvio padrão de 1.02, além do mais, existe correlação linear entre o valor observado e o valor estimado, que fica evidente com o coeficiente de correlação linear de 0.78. Dos 568 dados definidos, 558 se encontram dentro do intervalo do erro padrão.

IF

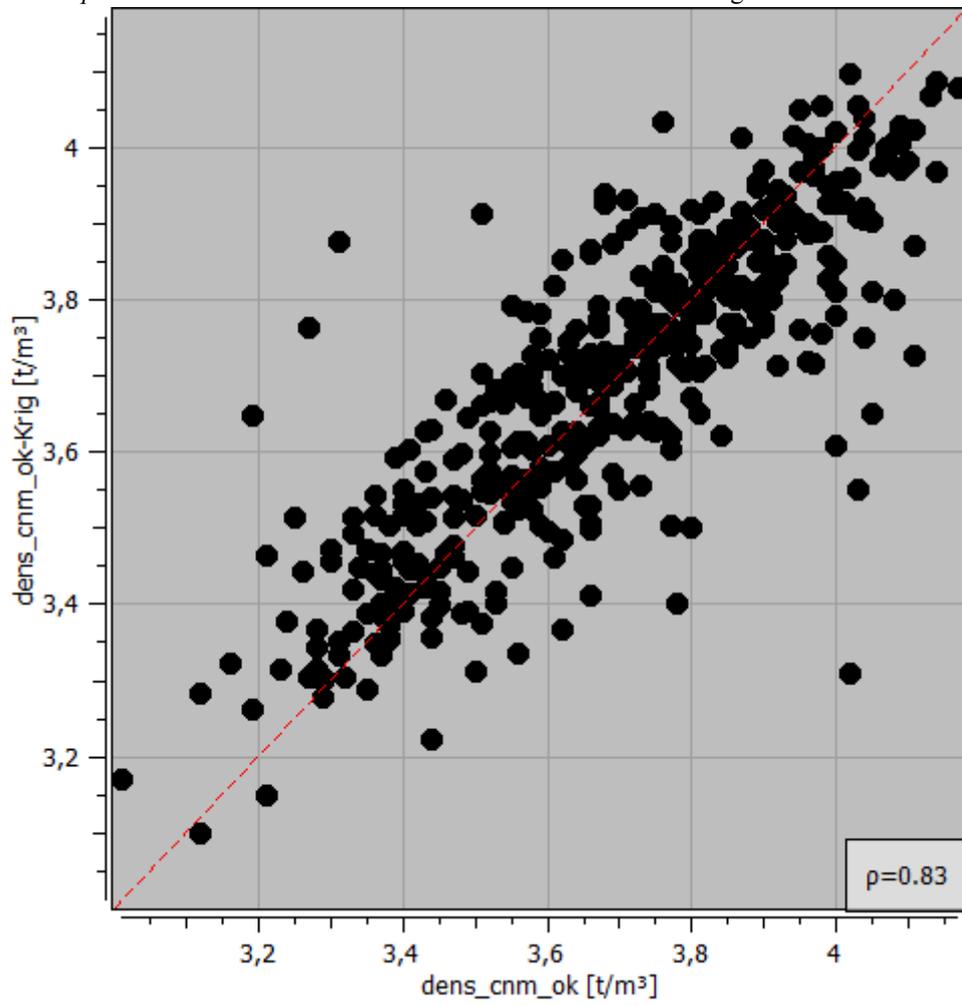
CNM

Figura 83 - Histograma do erro padrão da estimativa referente à litologia IF e método CNM.



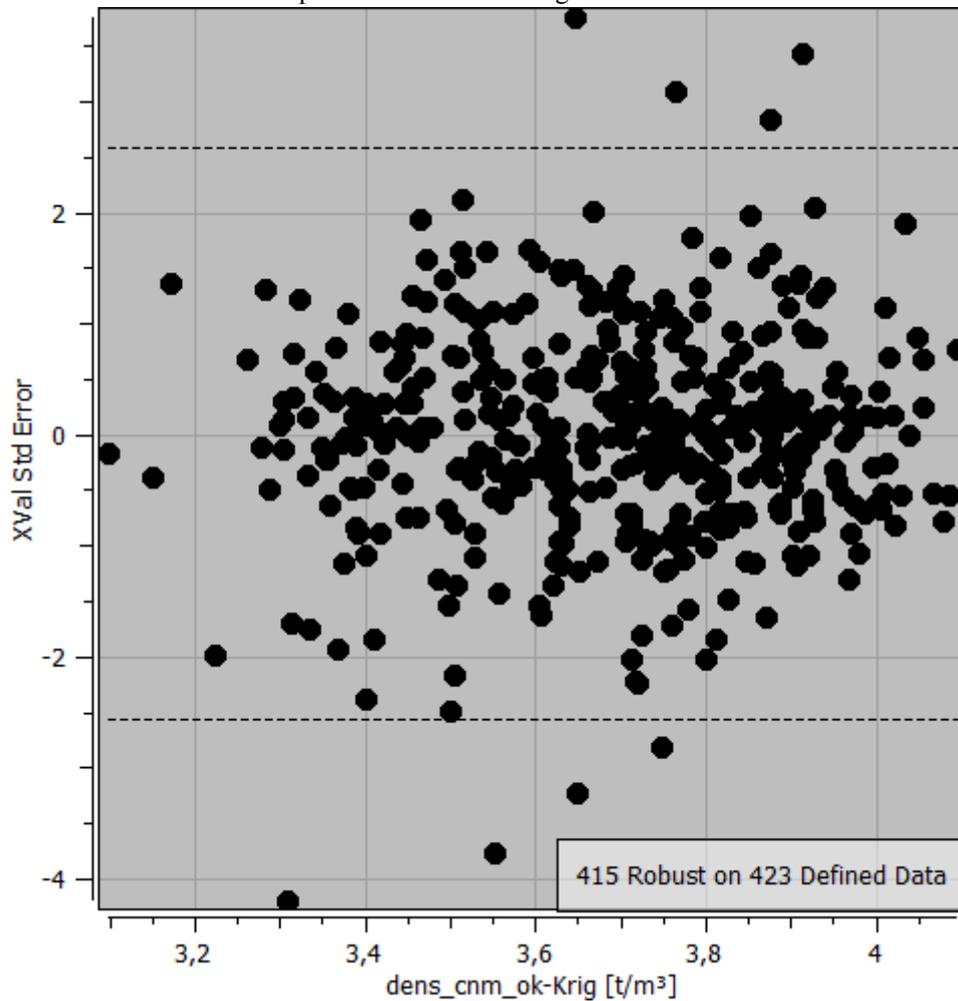
Fonte: elaborado pelo autor utilizando o *software Isatis.neo*.

Figura 84 - *Scatterplot* entre valor observado e valor estimado referente à litologia IF e método CNM.



Fonte: elaborado pelo autor utilizando o *software Isatis.neo*.

Figura 85 - Valor estimado *versus* erro padrão referente à litologia IF e método CNM.

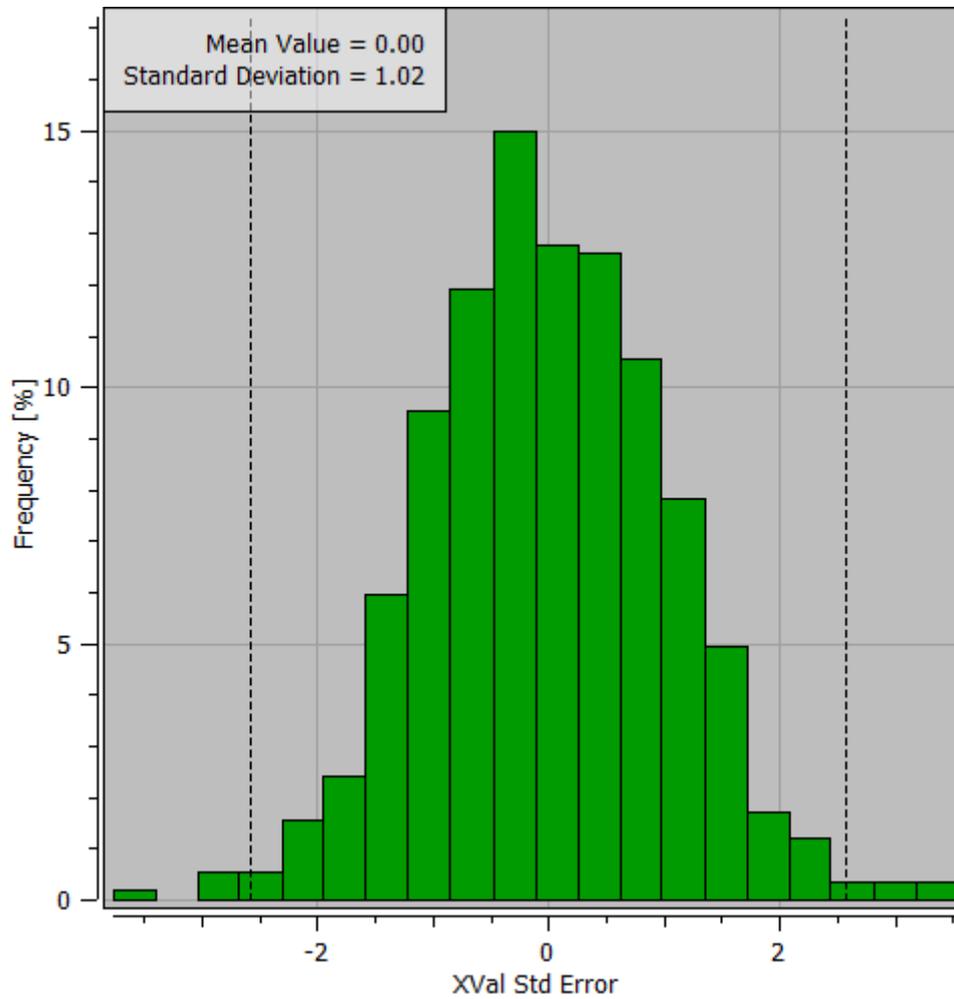


Fonte: elaborado pelo autor utilizando o *software Isatis.neo*.

Para a litologia IF e método CNM, a média do erro padrão foi -0.00, o desvio padrão 0.96, o coeficiente de correlação linear entre valor observado e estimado foi de 0.83, o que significa que há uma correlação linear entre os valores. Além do mais, dos 423 dados definidos, 415 dados se encontram dentro do intervalo do erro padrão da estimativa.

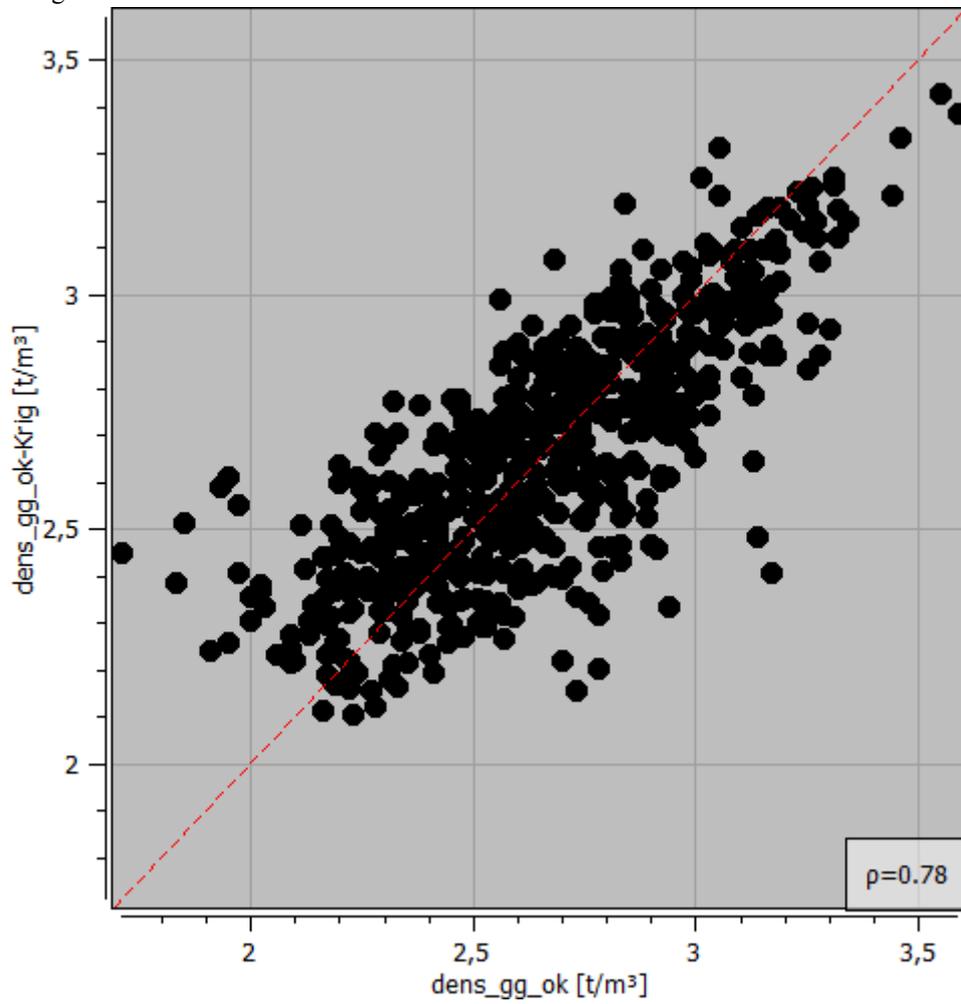
Gama-gama

Figura 86 - Histograma do erro padrão da estimativa referente à litologia IF e método da perfilagem geofísica gama-gama.



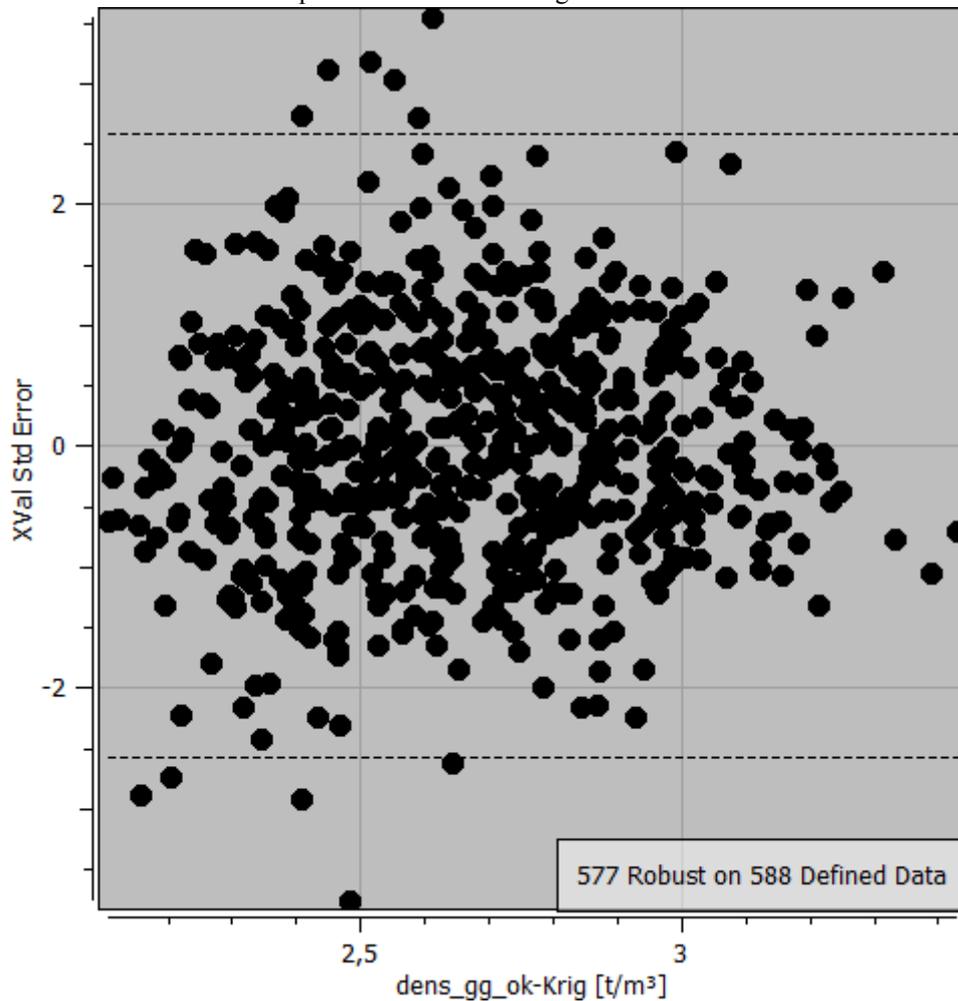
Fonte: elaborado pelo autor utilizando o *software Isatis.neo*.

Figura 87 - *Scatterplot* entre valor observado e valor estimado referente à litologia IF e método da perfilagem geofísica gama-gama.



Fonte: elaborado pelo autor utilizando o *software Isatis.neo*.

Figura 88 - Valor estimado *versus* erro padrão referente à litologia IF e método CNM.

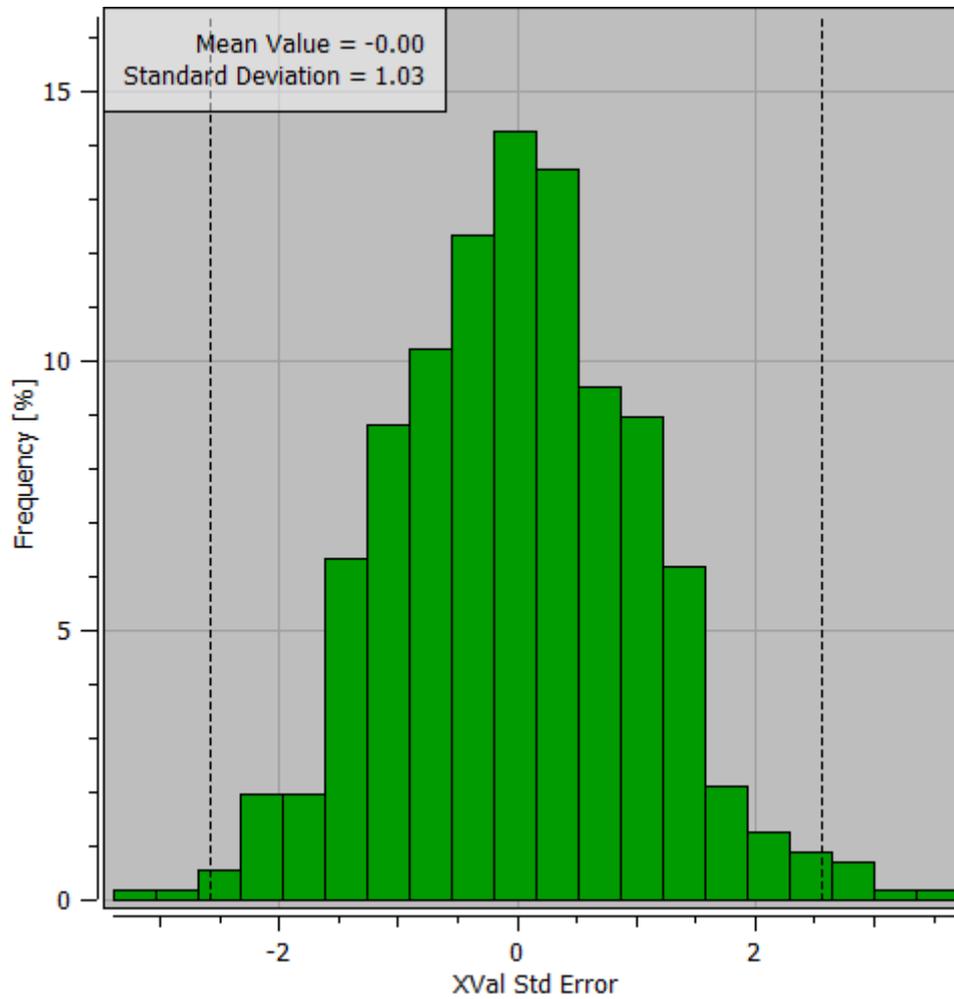


Fonte: elaborado pelo autor utilizando o *software Isatis.neo*.

Já para a estimativa do método da perfilagem geofísica gama-gama e litologia IF, a média do erro foi 0.00 e desvio padrão 1.02, o coeficiente de correlação linear foi 0.78, indicando correlação entre o valor observado e o valor estimado. Dos 588 dados definidos, 577 se encontram dentro do intervalo do erro padrão da estimativa.

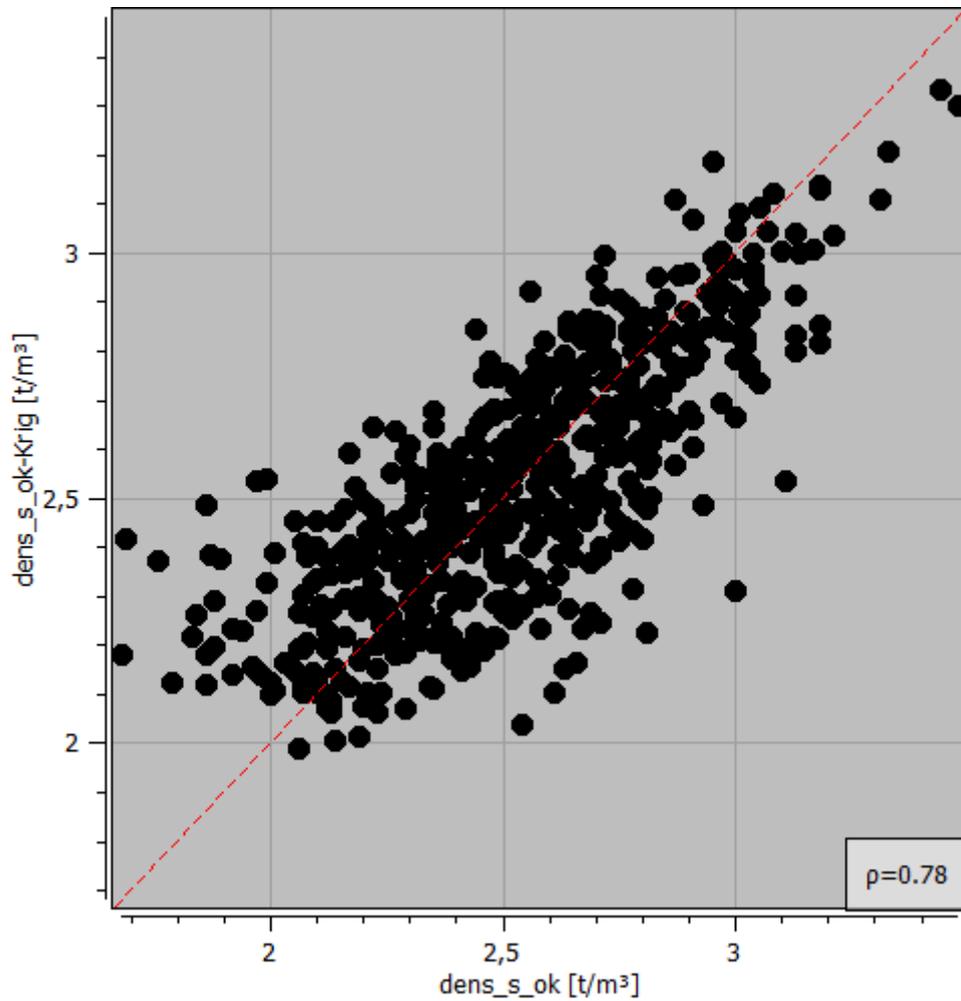
Ensaio diretos

Figura 89 - Histograma do erro padrão da estimativa referente à litologia IF e método dos ensaios diretos de laboratório.



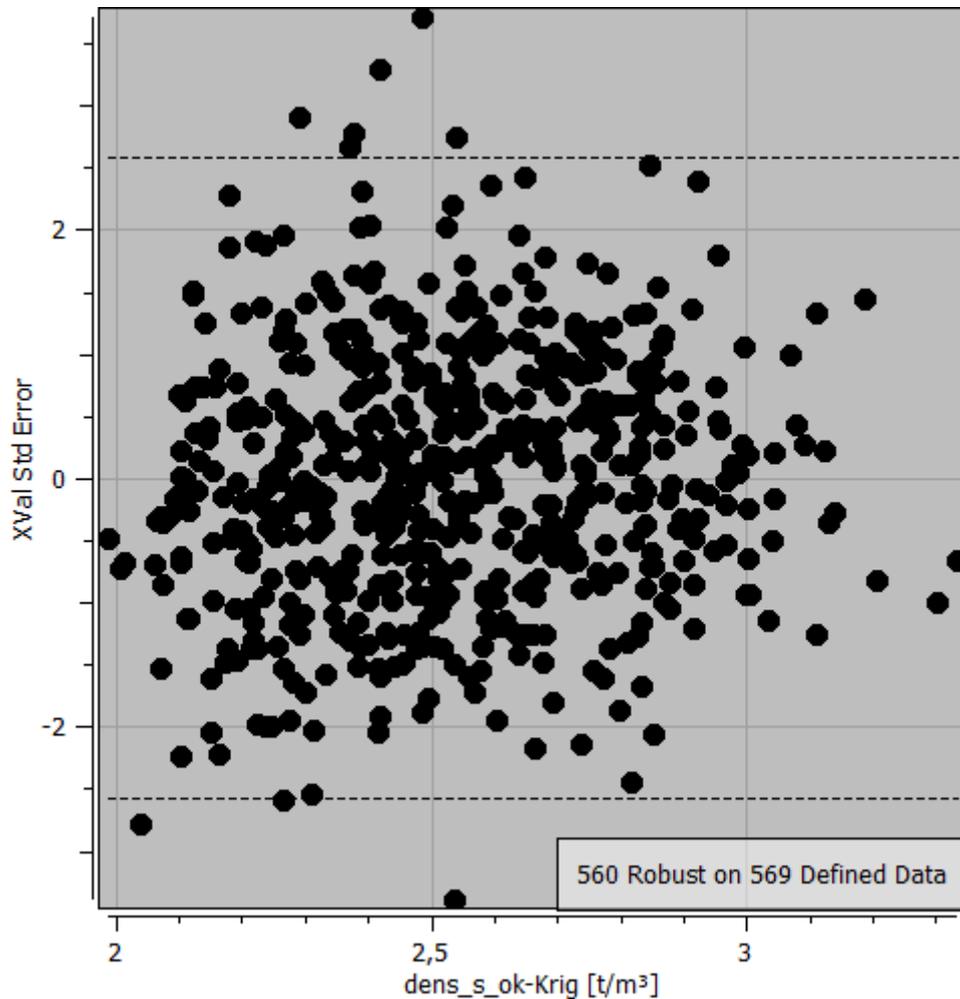
Fonte: elaborado pelo autor utilizando o *software Isatis.neo*.

Figura 90 - *Scatterplot* entre valor observado e valor estimado referente à litologia IF e método dos ensaios diretos de laboratório.



Fonte: elaborado pelo autor utilizando o *software Isatis.neo*.

Figura 91 - Valor estimado *versus* erro padrão referente à litologia IF e método dos ensaios diretos de laboratório.



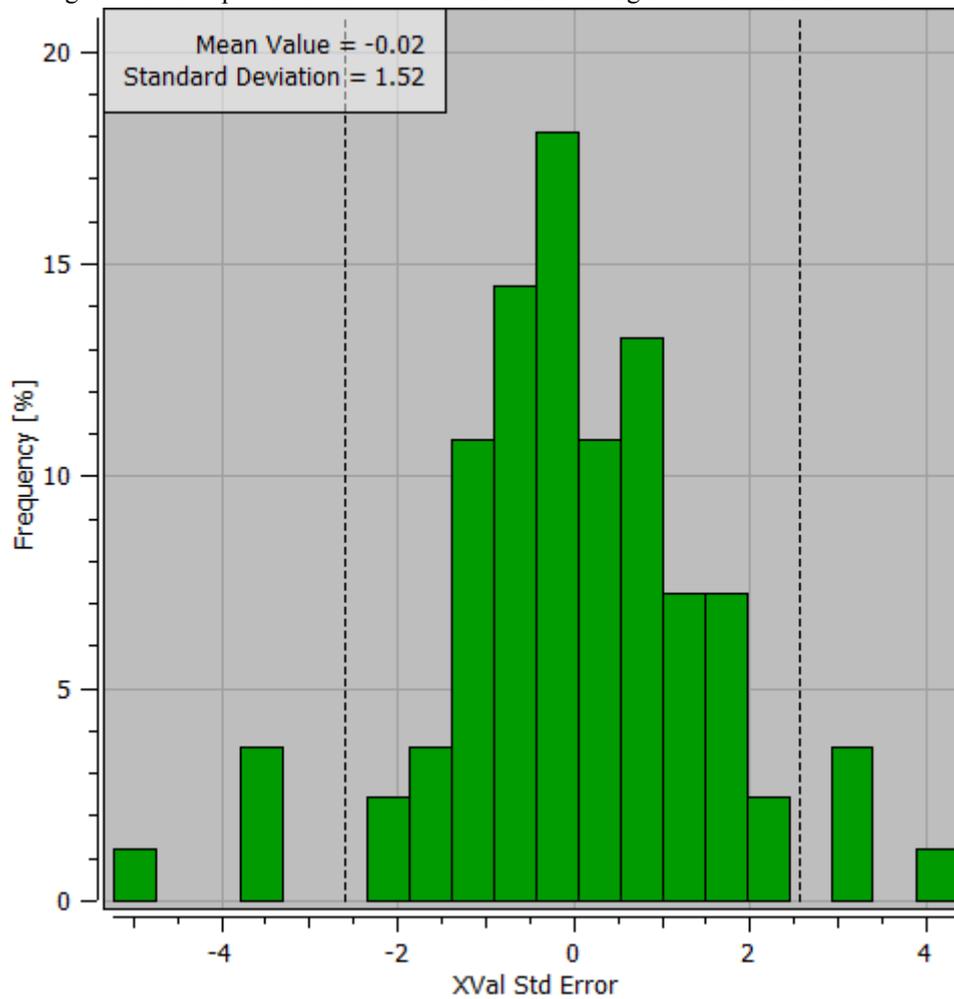
Fonte: elaborado pelo autor utilizando o *software Isatis.neo*.

A estimativa da litologia IF e método dos ensaios diretos de laboratório teve uma média de erro igual a -0.00, com desvio padrão 1.03, coeficiente de correlação linear de 0.78 que comprova a existência de correlação linear entre o valor observado e o valor estimado. Dos 569 dados definidos, 560 se encontram no intervalo do erro padrão.

IFR

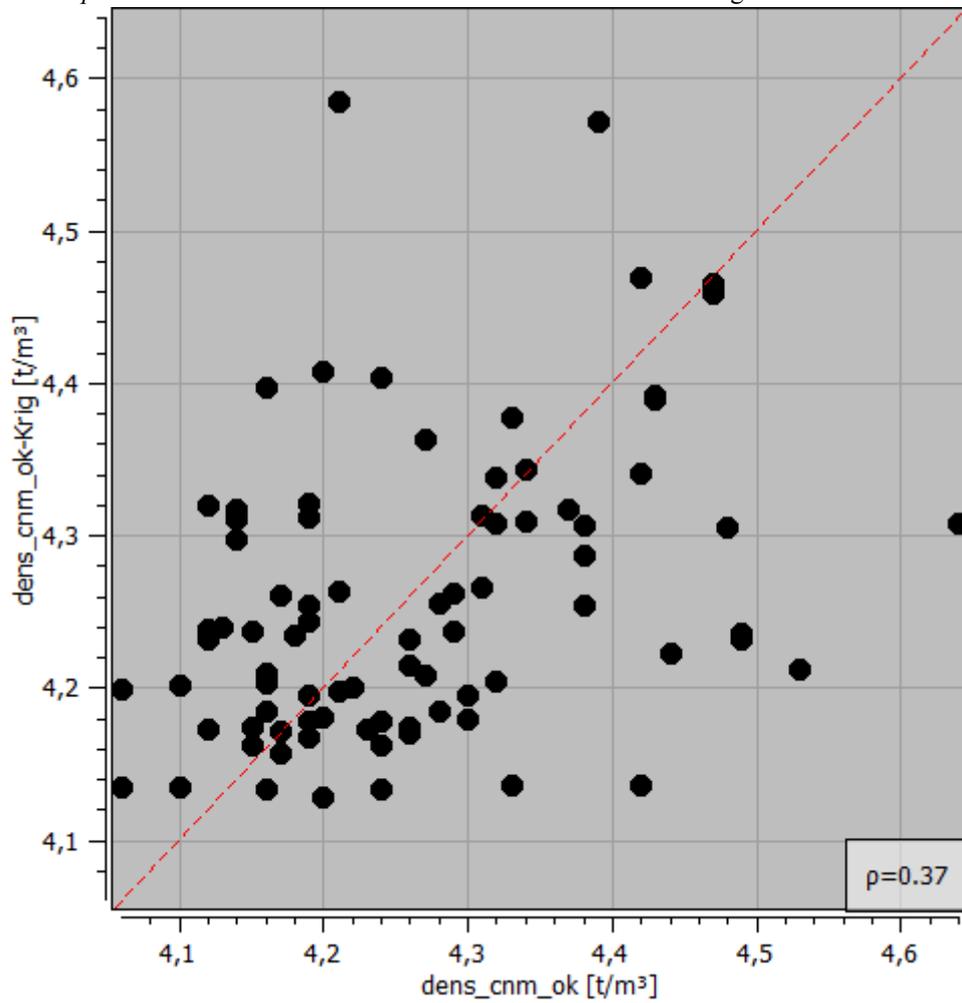
CNM

Figura 92 - Histograma do erro padrão da estimativa referente à litologia IFR e método CNM.



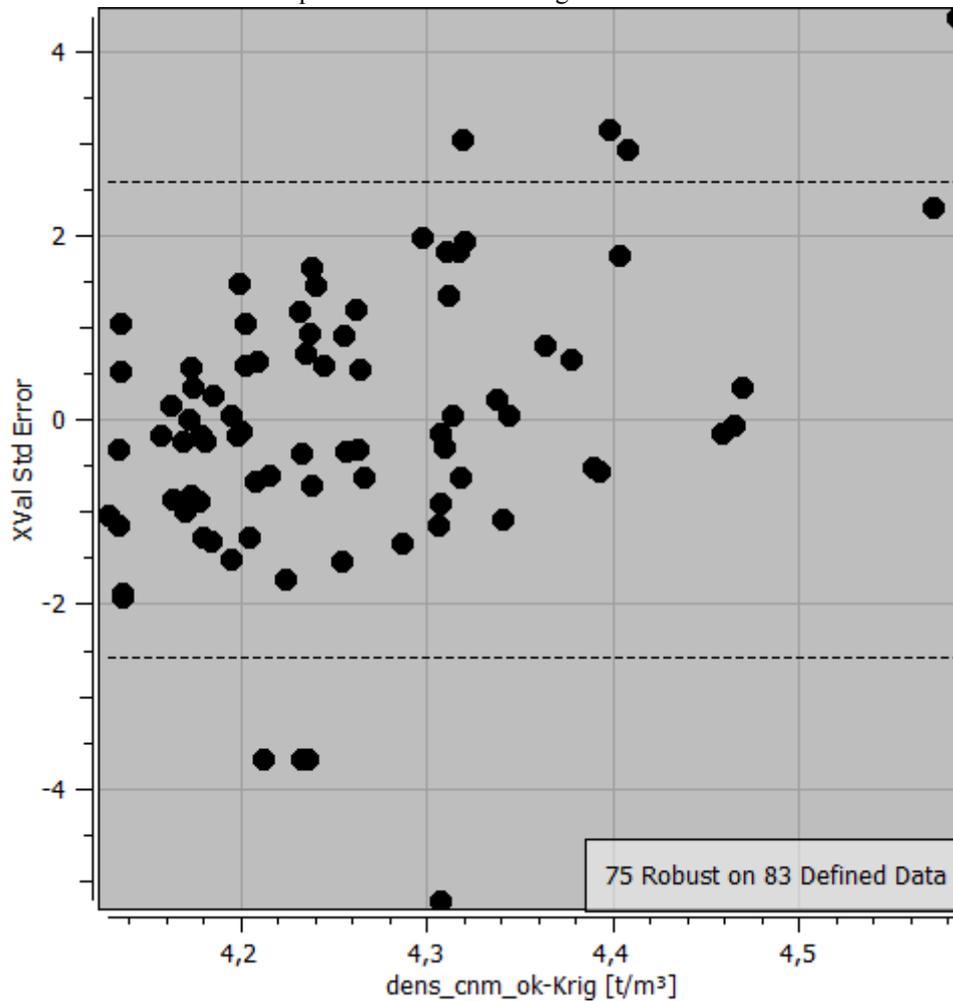
Fonte: elaborado pelo autor utilizando o *software Isatis.neo*.

Figura 93 - Scatterplot entre valor observado e valor estimado referente à litologia IFR e método CNM.



Fonte: elaborado pelo autor utilizando o software *Isatis.neo*.

Figura 94 - Valor estimado *versus* erro padrão referente à litologia IFR e método CNM.

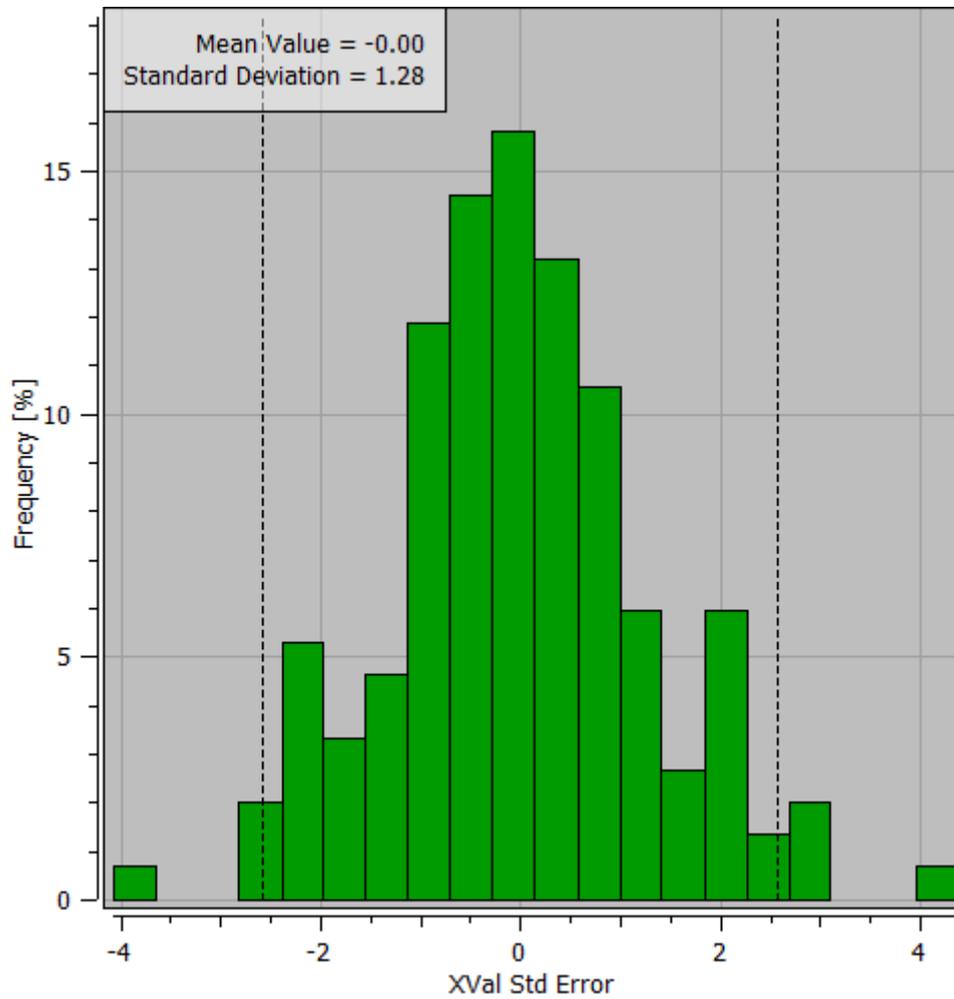


Fonte: elaborado pelo autor utilizando o *software Isatis.neo*.

Para a litologia IFR e método do CNM, a estimativa obteve uma média de erro de -0.02 e desvio padrão de 1.52. O coeficiente de correlação linear foi de 0.37 e significa que os valores estimados e os valores observados não apresentam uma correlação linear. Dos 83 valores definidos, 75 se encontram no intervalo do erro padrão.

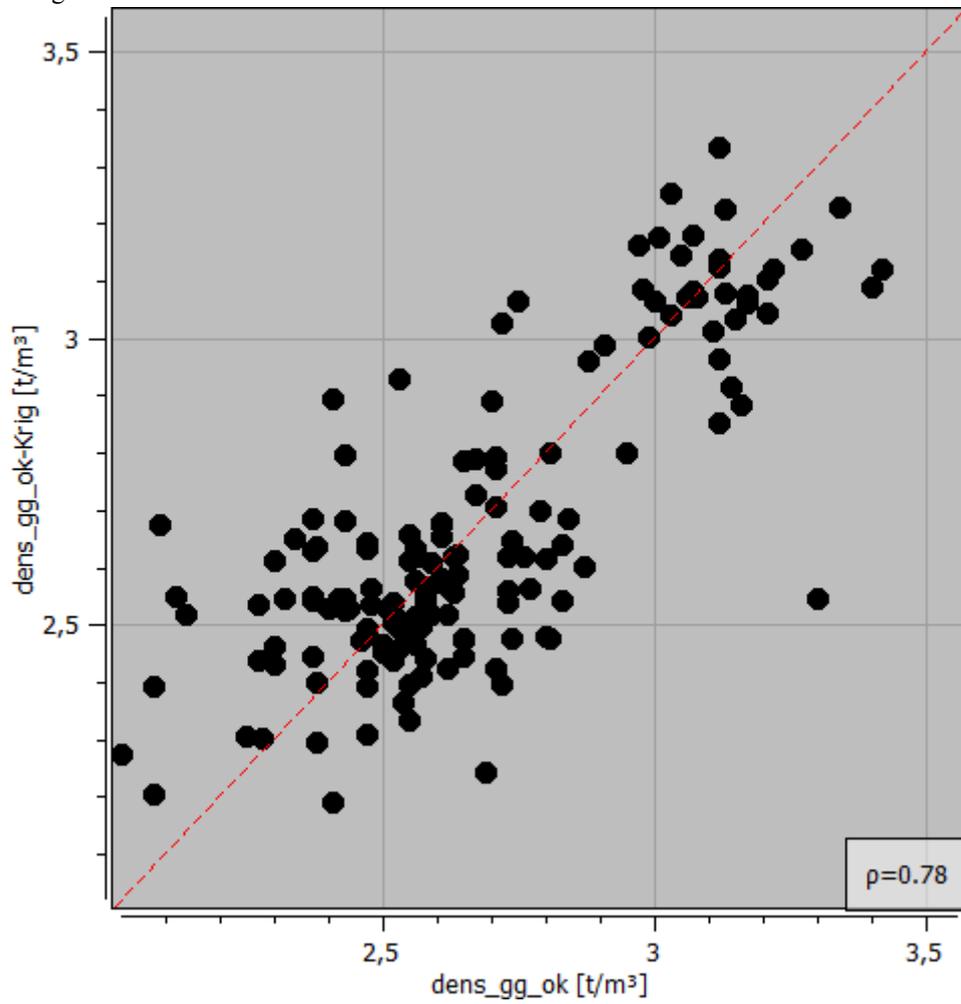
Gama-gama

Figura 95 - Histograma do erro padrão da estimativa referente à litologia IFR e método da perfilagem geofísica gama-gama.



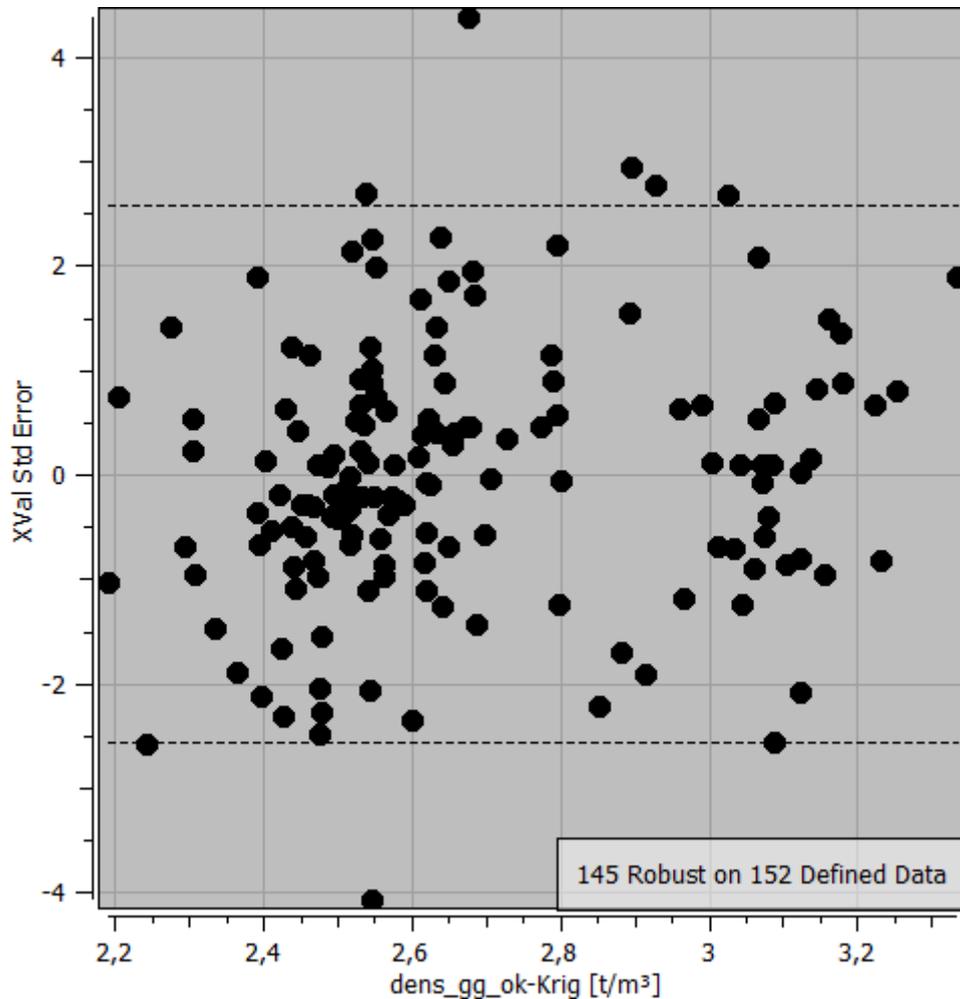
Fonte: elaborado pelo autor utilizando o *software Isatis.neo*.

Figura 96 - *Scatterplot* entre valor observado e valor estimado referente à litologia IFR e método da perfilagem geofísica gama-gama.



Fonte: elaborado pelo autor utilizando o *software Isatis.neo*.

Figura 97 - Valor estimado *versus* erro padrão referente à litologia IFR e método da perfilagem geofísica gama-gama.

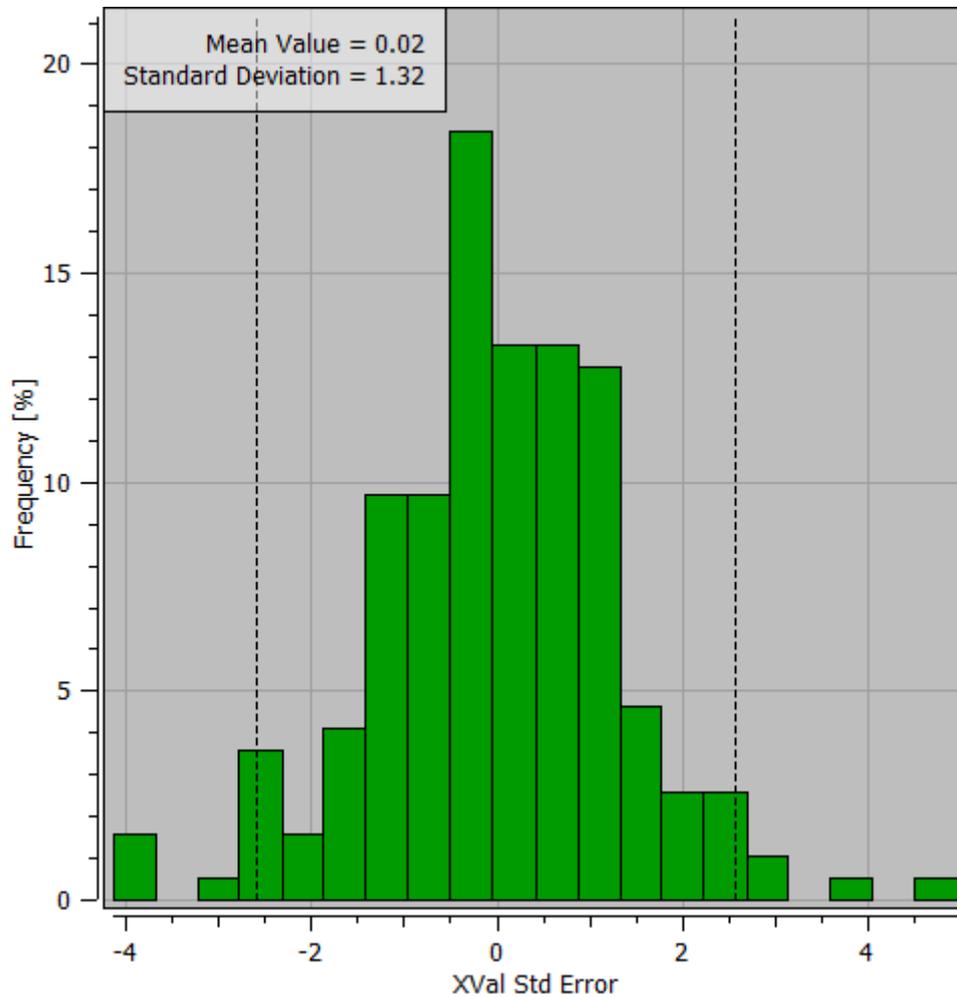


Fonte: elaborado pelo autor utilizando o *software Isatis.neo*.

Para a perfilagem geofísica gama-gama e litologia IFR, a estimativa obteve média de erro de -0,00 e desvio padrão de 1,28. Além do mais os dados observados e estimados apresentaram correlação linear, que ficou evidente pelo coeficiente de correlação linear com valor de 0,78. Dos 152 dados definidos, 145 se encontram no intervalo do erro padrão da estimativa.

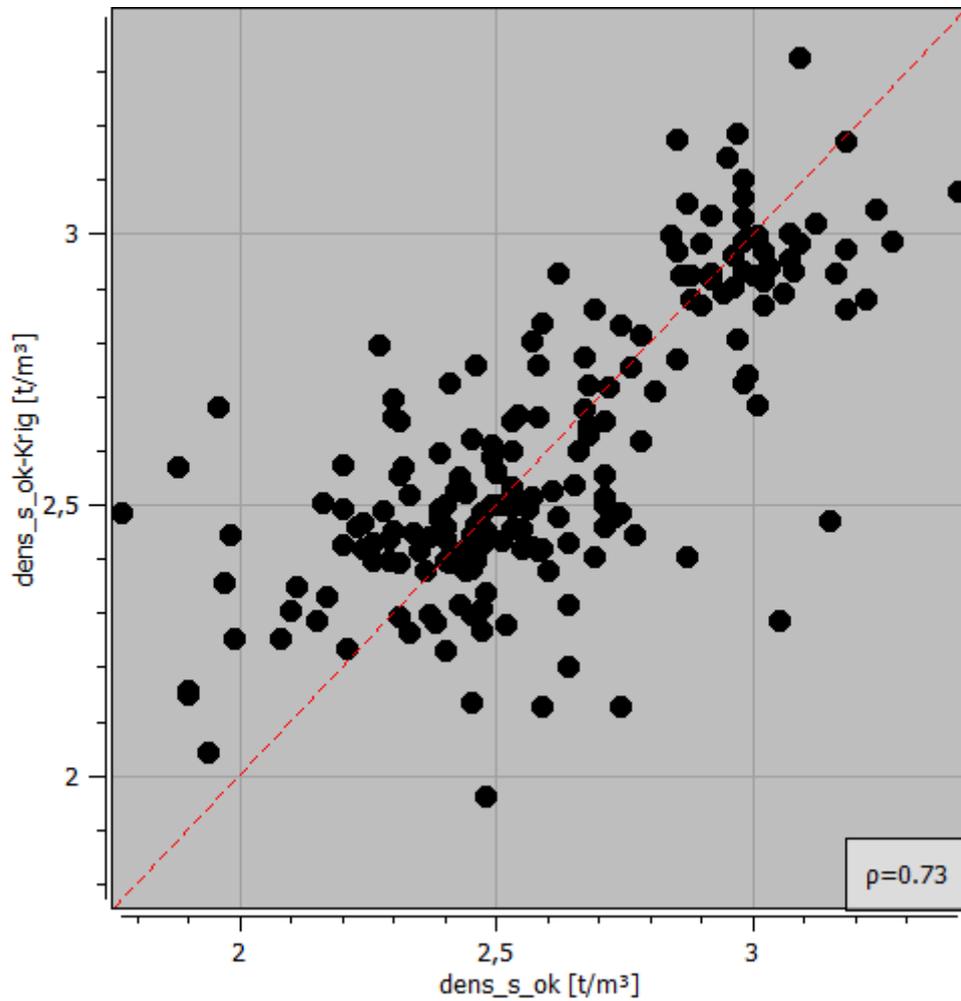
Ensaio diretos

Figura 98 - Histograma do erro padrão da estimativa referente à litologia IFR e método dos ensaios diretos de laboratório.



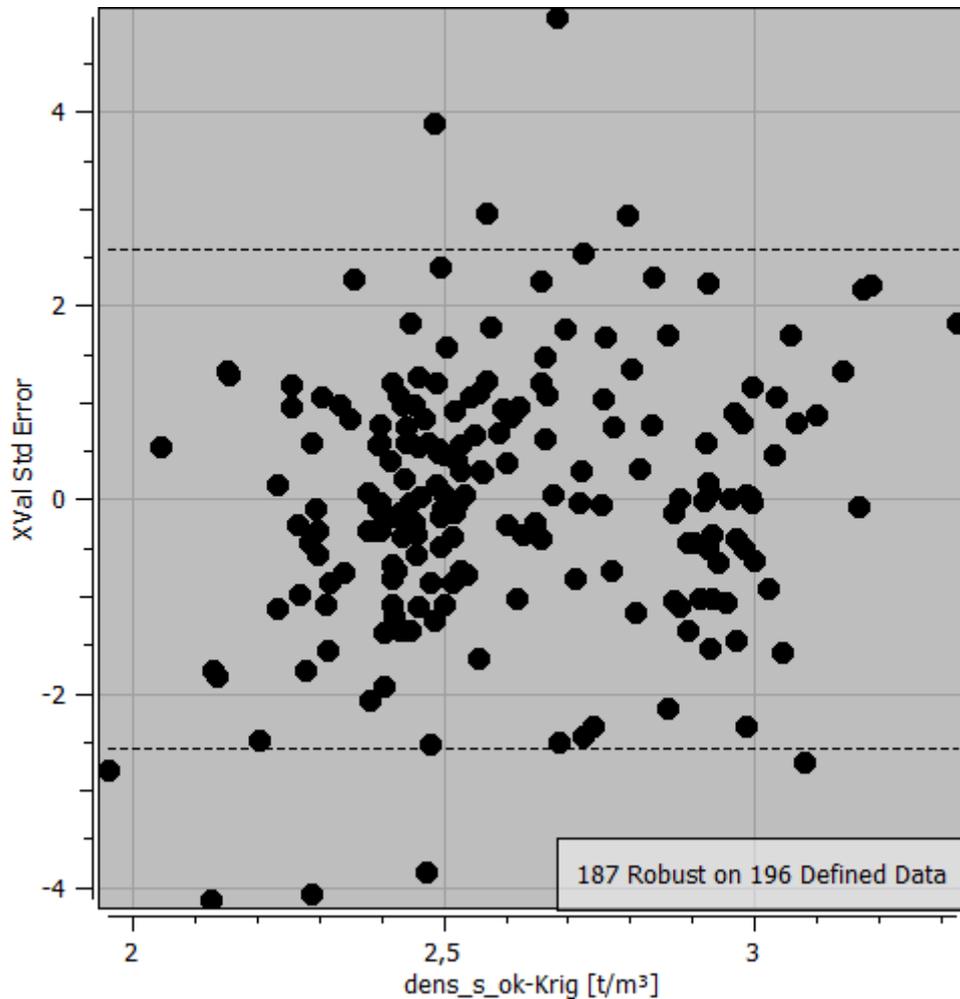
Fonte: elaborado pelo autor utilizando o *software Isatis.neo*.

Figura 99 - *Scatterplot* entre valor observado e valor estimado referente à litologia IFR e método dos ensaios diretos de laboratório.



Fonte: elaborado pelo autor utilizando o *software Isatis.neo*.

Figura 100 - Valor estimado *versus* erro padrão referente à litologia IFR e método dos ensaios diretos de laboratório.



Fonte: elaborado pelo autor utilizando o *software Isatis.neo*.

Para a litologia IFR e método dos ensaios diretos de laboratório, a média do erro foi igual a 0.02 e o desvio padrão 1.32. Os dados exibiram um coeficiente de correlação linear de 0.73, indicando a existência de correlação linear entre os valores observados e os valores estimados. Dos 196 dados definidos, 187 estão no intervalo do erro padrão da estimativa.

5. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados acerca do trabalho, com foco em comparar os resultados das estimativas entre si e com os dados das análises para cada um dos métodos. Esta comparação será realizada para cada litologia, comparando os 3 métodos, além de utilizar o valor médio de densidade descrito no relatório técnico da mina para cada litologia como sendo o valor de referência. Para auxiliar na comparação serão utilizados *scatterplots* e matriz de correlação. Além do mais para a comparação, foram selecionados os blocos em comum que continham informações de densidade para os três métodos simultaneamente. Outro fator importante de salientar é que a massa expressa nas Tabelas apresentadas a seguir, foi calculada multiplicando o valor de densidade de cada bloco por seu volume e, posteriormente, feito o somatório destes produtos. As comparações descritas neste capítulo utilizam o método da perfilagem geofísica gama-gama como referência.

IC

Para poder comparar as estimativas, tanto entre si quanto com os valores amostrados por cada um dos métodos, foi construída a Tabela 43 apresentada a seguir, que contém o sumário estatístico da densidade observada e estimada por cada um dos métodos.

Tabela 43 - Comparação entre os sumários estatísticos dos valores observados e valores estimados para a litologia IC.

	Média	Variância	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
CNM	3.68	0.02736	0.17	3.16	4.44
CNM estimado	3.65	0.01778	0.13	3.17	4.34
Gama-gama	3.02	0.09346	0.31	2.15	3.95
Gama-gama estimado	3.03	0.04548	0.21	2.42	3.60
Ensaio direto	3.00	0.09038	0.30	2.00	3.69
Ensaio direto estimado	3.04	0.06168	0.25	2.26	3.68
Relatório da mina	2.81	0.01	0.09	2.24	3.31

Fonte: elaborado pelo autor.

Podemos observar que a média do erro padrão obtida na validação cruzada é diferente do erro residual entre a média dos valores observada e a média dos valores estimados. Para o CNM os valores de mínimo e máximo são bem próximos para o valor observado e o valor estimado, além do mais a diferença entre a média dos valores é de 0.03, sendo o valor médio da estimativa para o CNM subestimado quando comparada com a média dos valores observados.

Para o método da perfuração geofísica gama-gama os valores da média entre valor observado e valor estimado ficaram próximos, sendo 0.01 a diferença, entretanto o intervalo de máximo e mínimo dos valores estimados foi menor que os valores observados, sendo o valor mínimo estimado 0.27 maior que o valor mínimo observado e o valor máximo estimado 0.35 menor que o valor máximo observado. Provavelmente esta diferença entre os valores de máximo e mínimo entre os dados observados e os dados estimados tenha gerado a discrepância entre variância e desvio padrão dos valores observados e estimados.

No que diz respeito aos ensaios diretos de obtenção de densidade, a diferença entre a média dos valores observados e valores estimados foi de 0.04. Quanto aos valores de mínimo e máximo, os valores de mínimo apresentaram uma diferença de 0.26 e, de maneira semelhante à perfilagem geofísica gama-gama, os valores estimados tiveram o valor de mínimo maior que os valores observados. Entretanto para os valores de máximo, apesar do valor estimado ter sido menor que o valor observado, a diferença foi de apenas 0.01, fazendo com que os valores de variância e desvio padrão apesar de diferentes, ficassem mais próximos entre si quando comparados com o método da perfilagem geofísica gama-gama, por exemplo.

Para poder comparar as estimativas, a Tabela 44 a seguir foi construída considerando apenas a seleção dos blocos que continham estimativa de densidade para os três métodos simultaneamente. Assim, é importante salientar que para a litologia IC foram selecionados 6315 blocos.

Tabela 44 - Tabela contendo o sumário estatístico apenas dos blocos selecionados.

	Total de blocos	Densidade média	Variância	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
CNM	6315	3.63	0.01214	0.11	3.42	4.33
Gama-Gama	6315	2.85	0.005299	0.07	2.62	3.16
Ensaio diretos	6315	2.81	0.01352	0.12	2.47	3.41

Fonte: elaborado pelo autor.

Como foi dito anteriormente, os blocos têm dimensões de 1000m³, assim o volume rochoso é o mesmo para as três situações, sendo de 6,315,000m³ (seis milhões e trezentos e quinze mil metros cúbicos). A massa rochosa para cada método é apresentada na Tabela 45 a seguir.

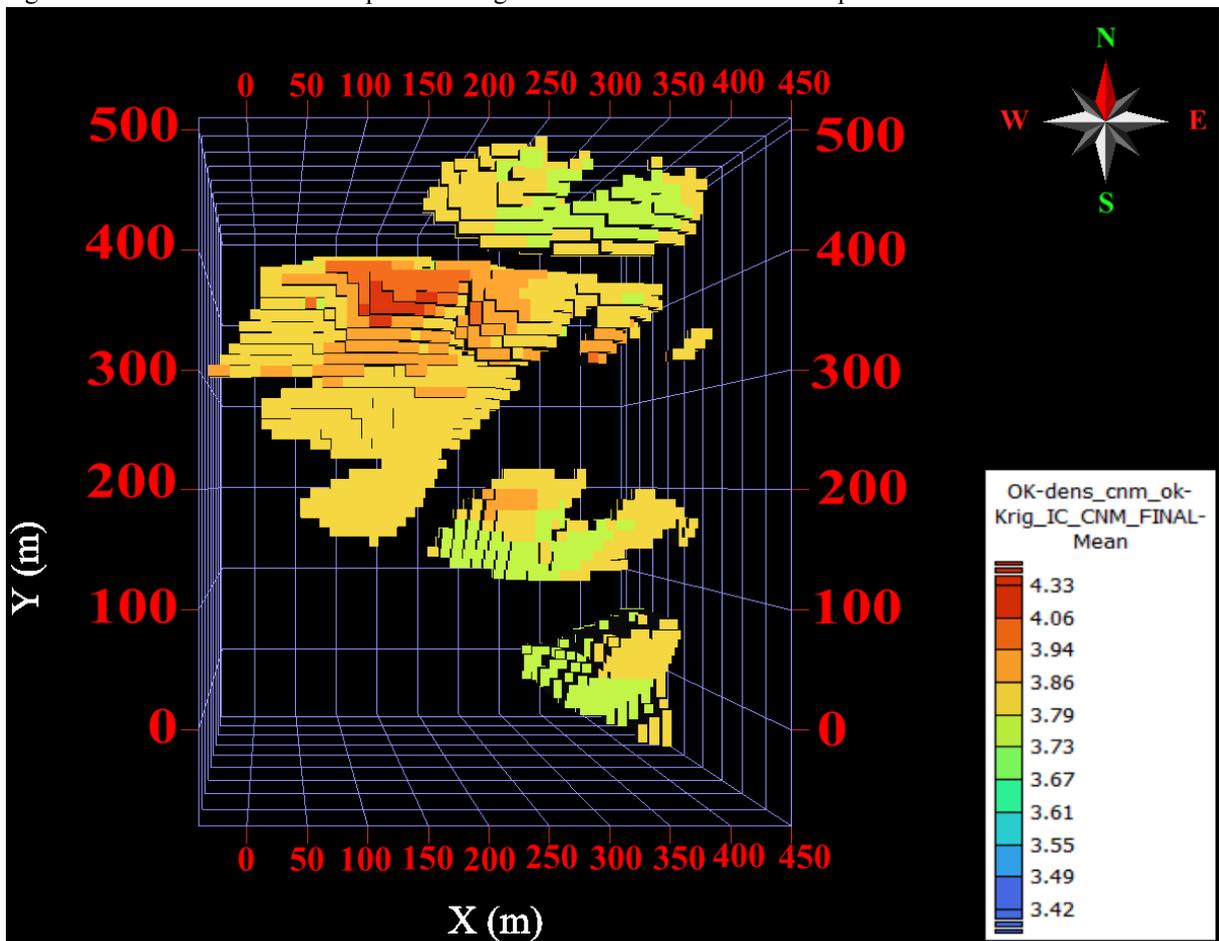
Tabela 45 - Cálculo da massa em toneladas a partir do volume e da densidade média.

	Total de blocos	Volume de cada bloco (m ³)	Massa (ton)
CNM	6315	1000	22,901,560
Gama-Gama	6315	1000	17,982,240
Ensaio direto	6315	1000	17,737,290
Relatório da mina	6315	1000	17,745,150

Fonte: elaborado pelo autor.

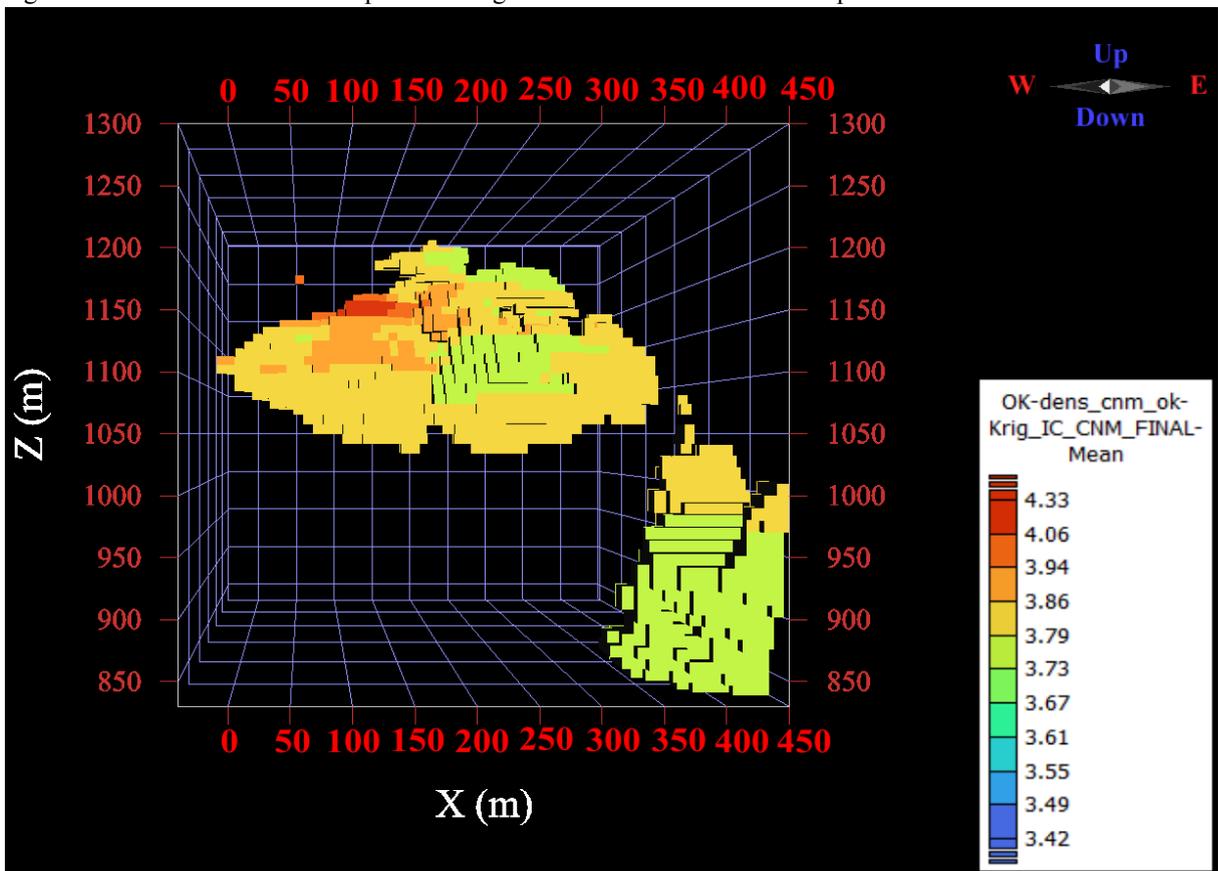
As Figuras 101 - 106 apresentadas a seguir representam os blocos selecionados para cada um dos métodos vistos em planta e em perfil seguindo a mesma ordem da tabela de apresentação, isto é, método CNM, gama-gama e ensaios diretos. Em seguida, as Figuras 107 - 112 abaixo representam os *scatterplots* de correlação linear e de *rank* das variáveis densidade e massa para os blocos selecionados, ambos com o método da perfilagem geofísica gama-gama como a variável independente. Já as Tabelas 46 e 47 a seguir exibem as matrizes de correlação da densidade dos blocos selecionados utilizando o método da perfilagem gama-gama como base, tanto com o coeficiente de Pearson, quanto de Spearman. Os *scatterplots* referentes aos coeficientes de *rank* são apresentados somente para a densidade estimada e blocos selecionados.

Figura 101 - Blocos selecionados para a litologia IC e método CNM visto em planta.



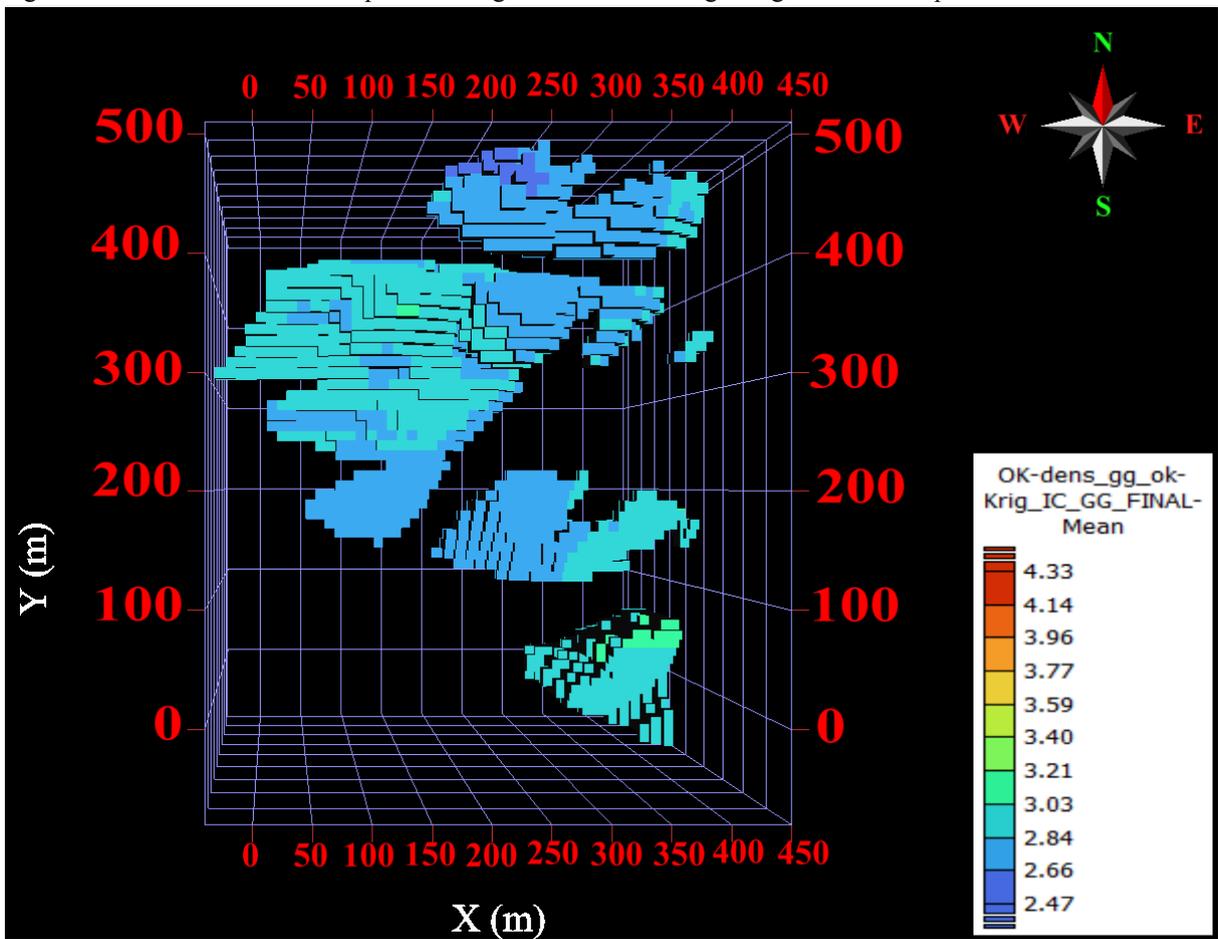
Fonte: elaborado pelo autor utilizando o software *Isatis.neo*.

Figura 102 - Blocos selecionados para a litologia IC e método CNM visto em perfil.



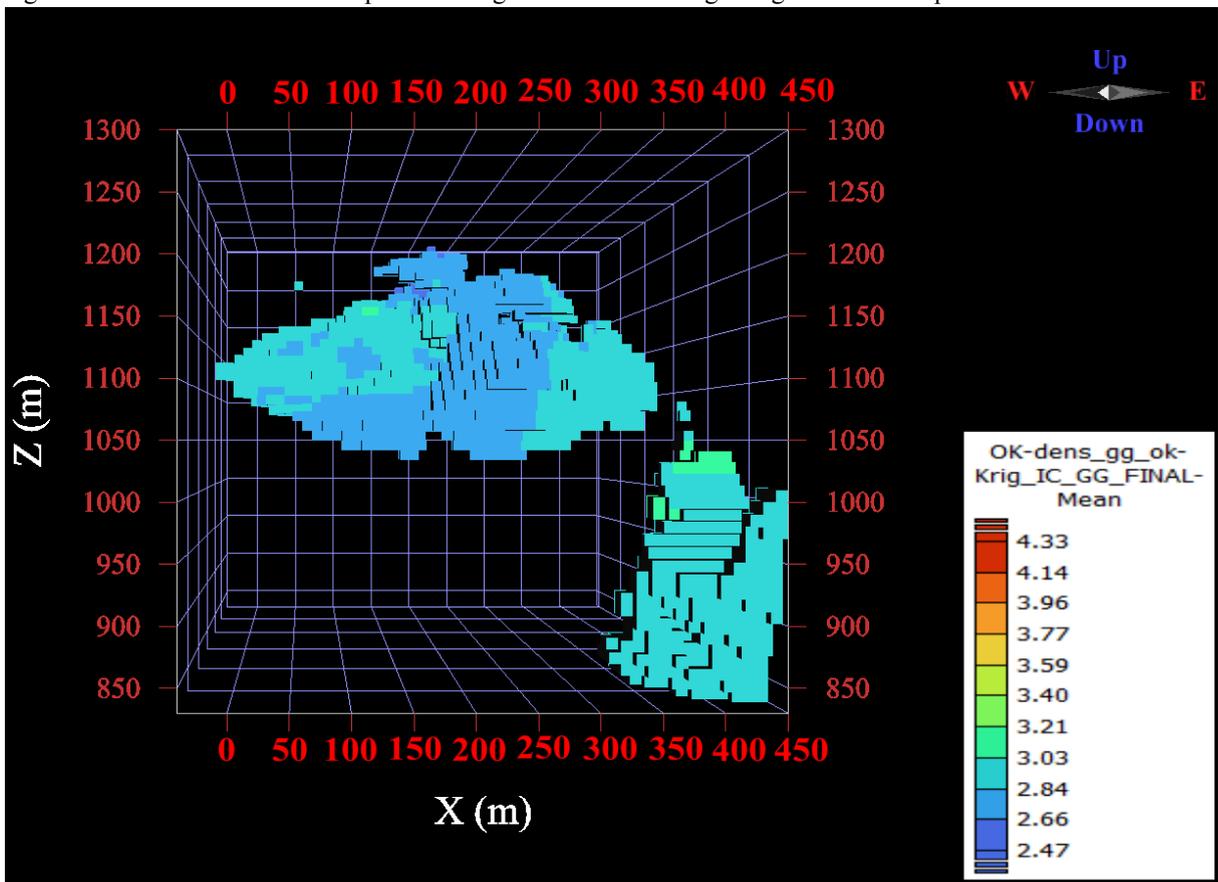
Fonte: elaborado pelo autor utilizando o software *Isatis.neo*.

Figura 103 - Blocos selecionados para a litologia IC e método do gama-gama visto em planta.



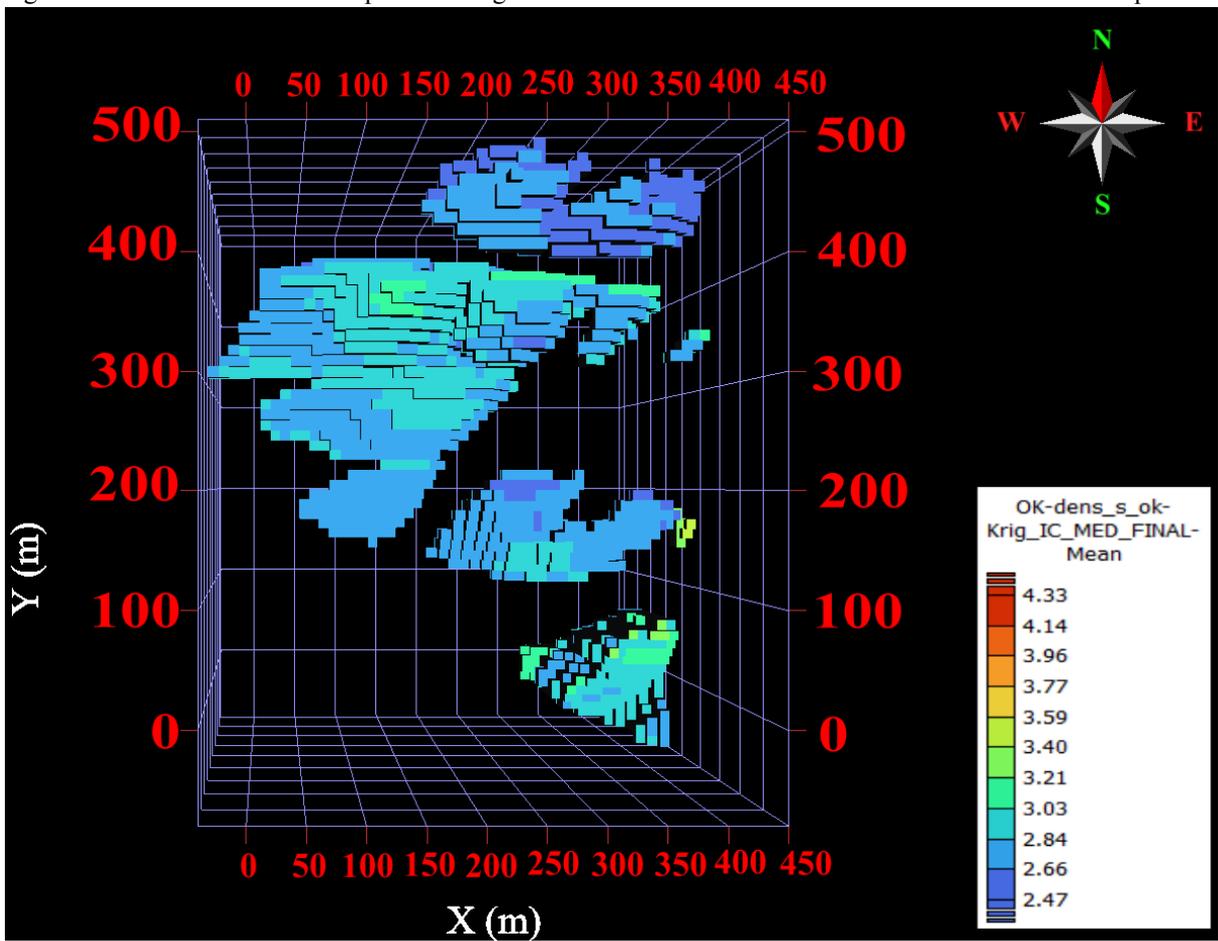
Fonte: elaborado pelo autor utilizando o software *Isatis.neo*.

Figura 104 - Blocos selecionados para a litologia IC e método do gama-gama visto em perfil.



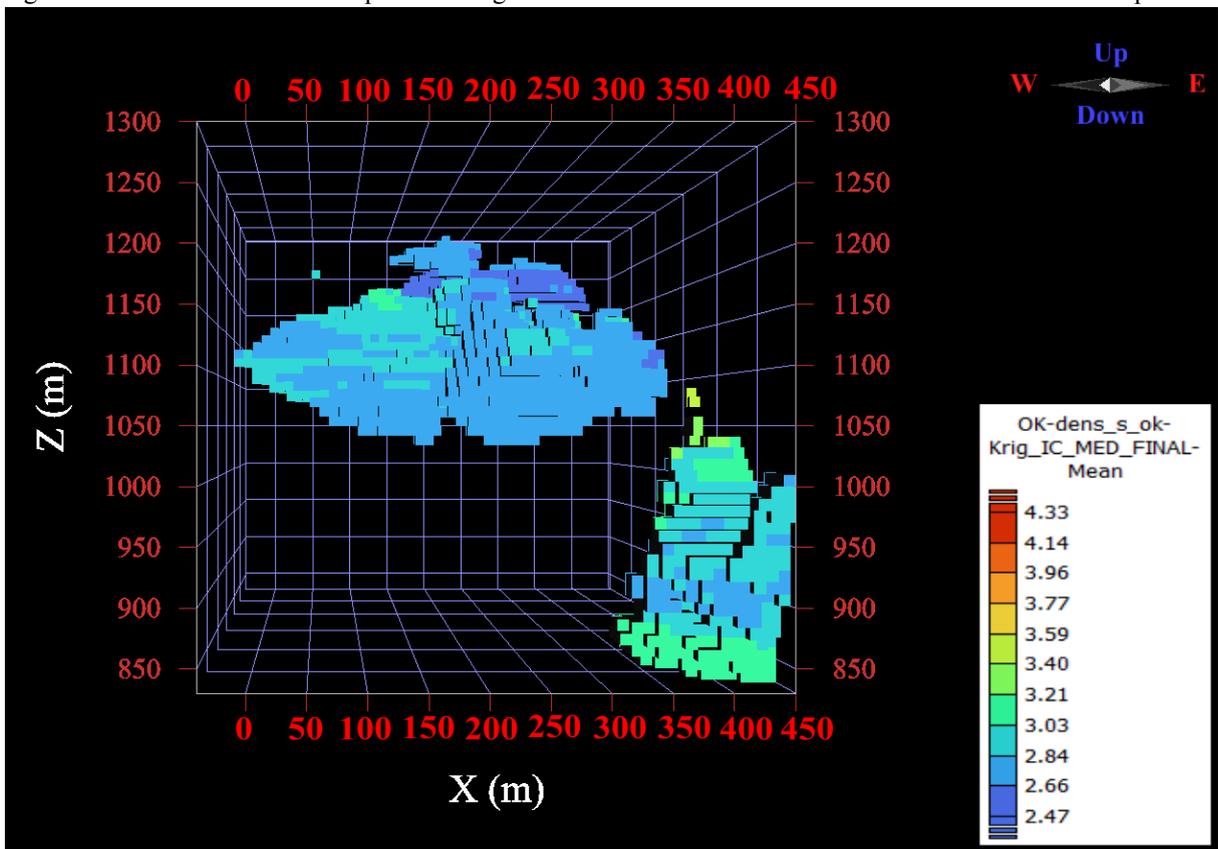
Fonte: elaborado pelo autor utilizando o *software Isatis.neo*.

Figura 105 - Blocos selecionados para a litologia IC e método dos ensaios diretos de laboratório visto em planta.



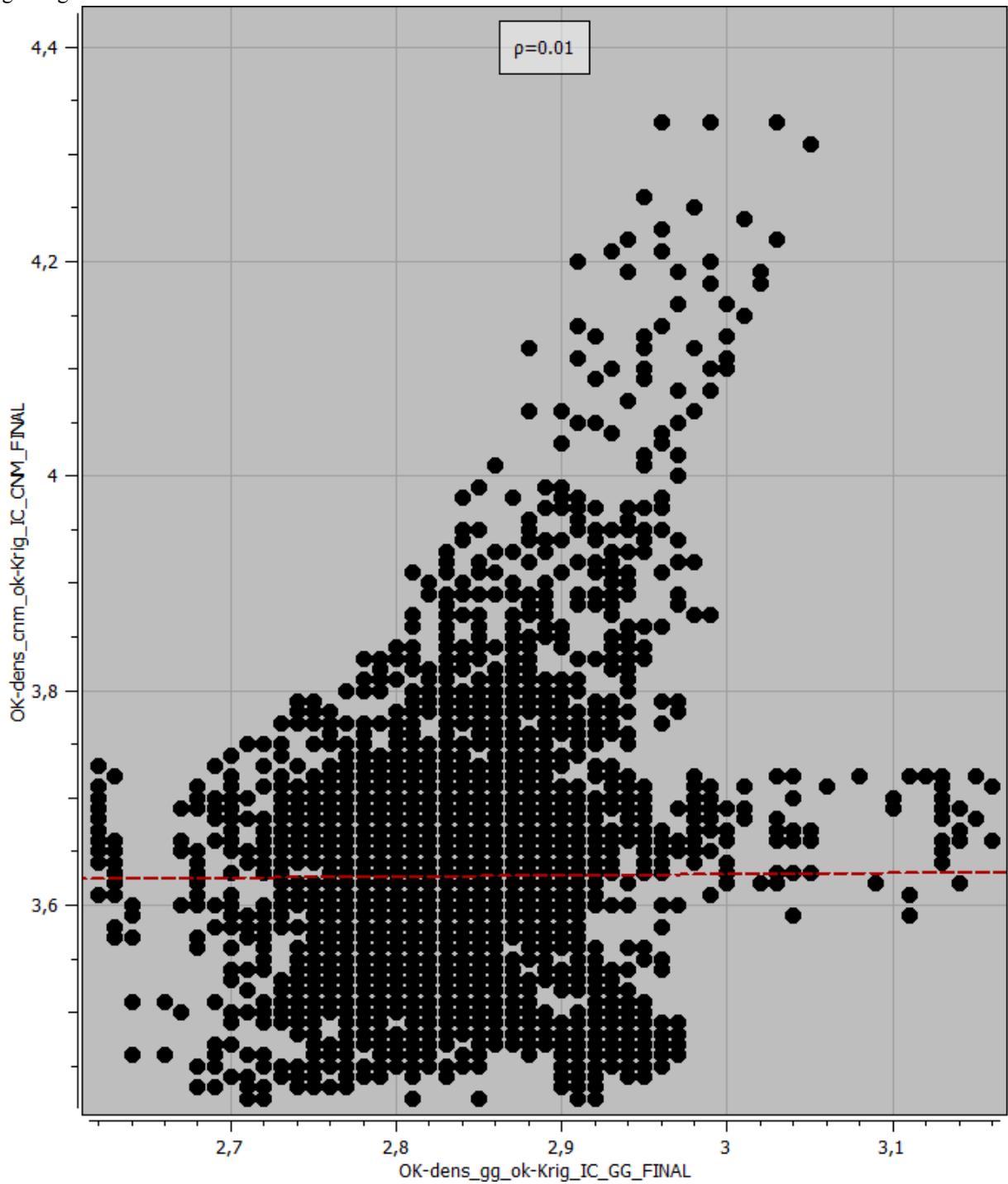
Fonte: elaborado pelo autor utilizando o software *Isatis.neo*.

Figura 106 - Blocos selecionados para a litologia IC e método dos ensaios diretos de laboratório visto em perfil.



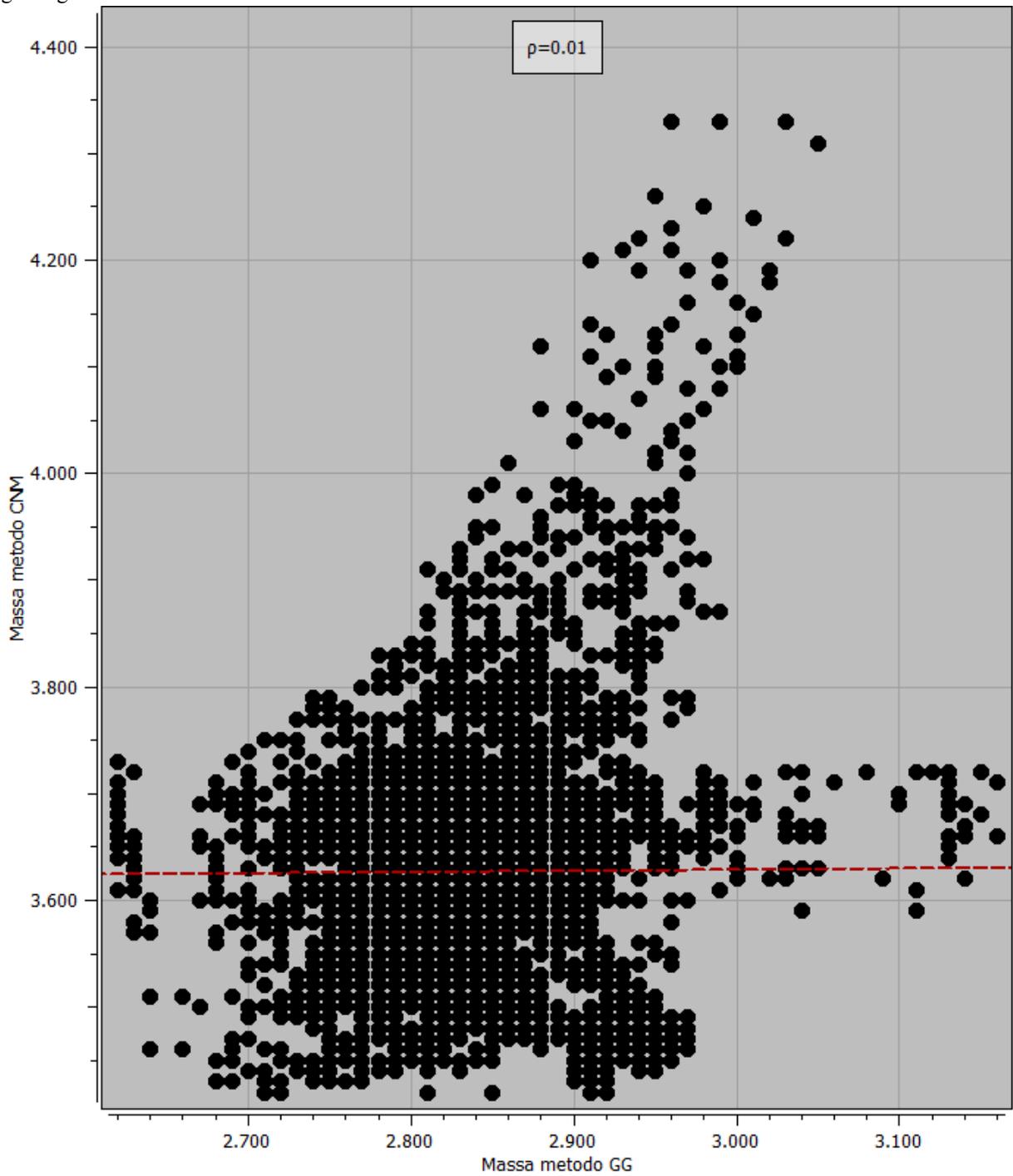
Fonte: elaborado pelo autor utilizando o software *Isatis.neo*.

Figura 107 - Scatterplot da densidade estimada dos blocos selecionados do método da perfilagem geofísica gama-gama versus CNM.



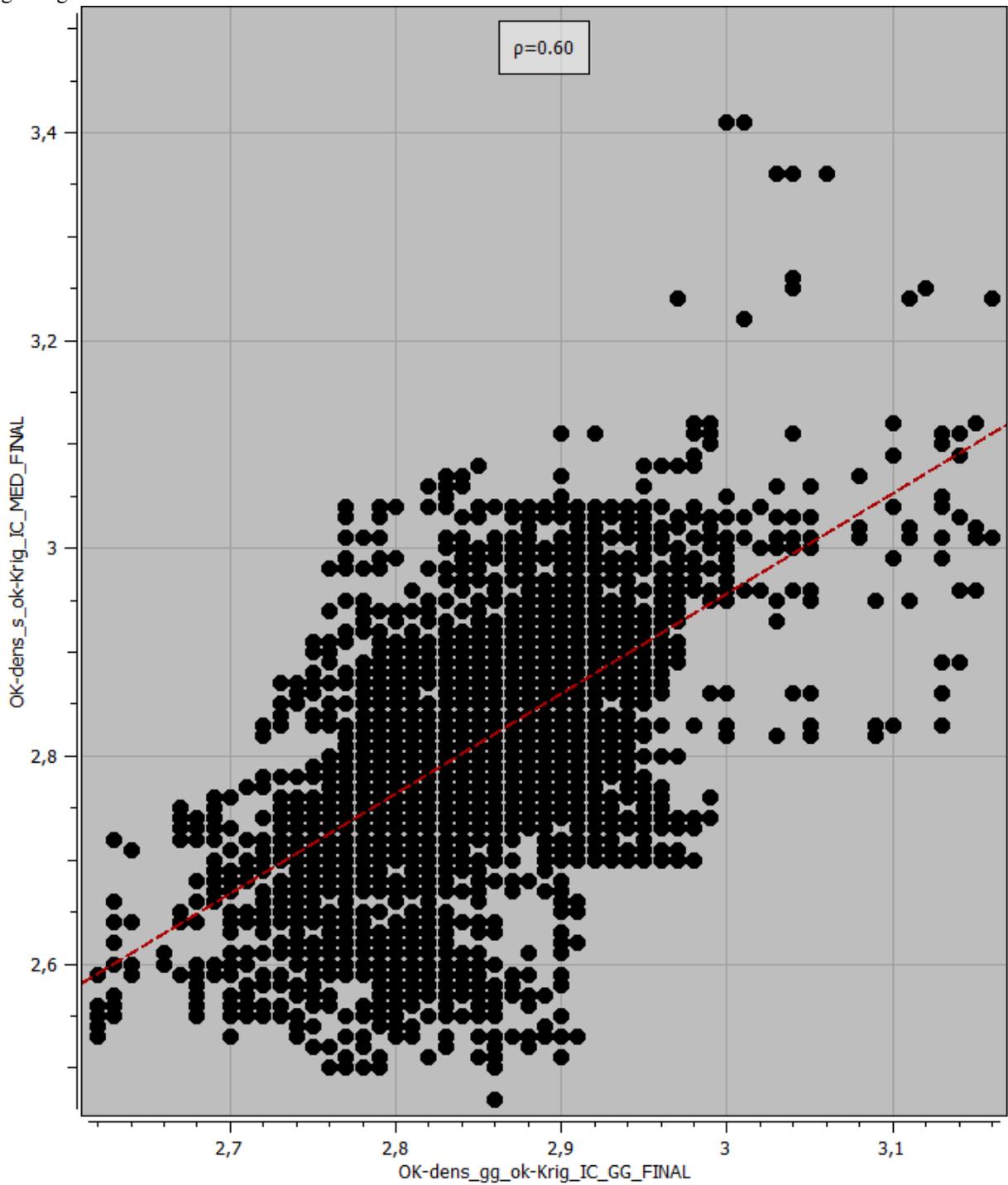
Fonte: elaborado pelo autor utilizando o software *Isatis.neo*.

Figura 108 - *Scatterplot* da massa calculada dos blocos selecionados do método da perfilagem geofísica gama-gama versus CNM.



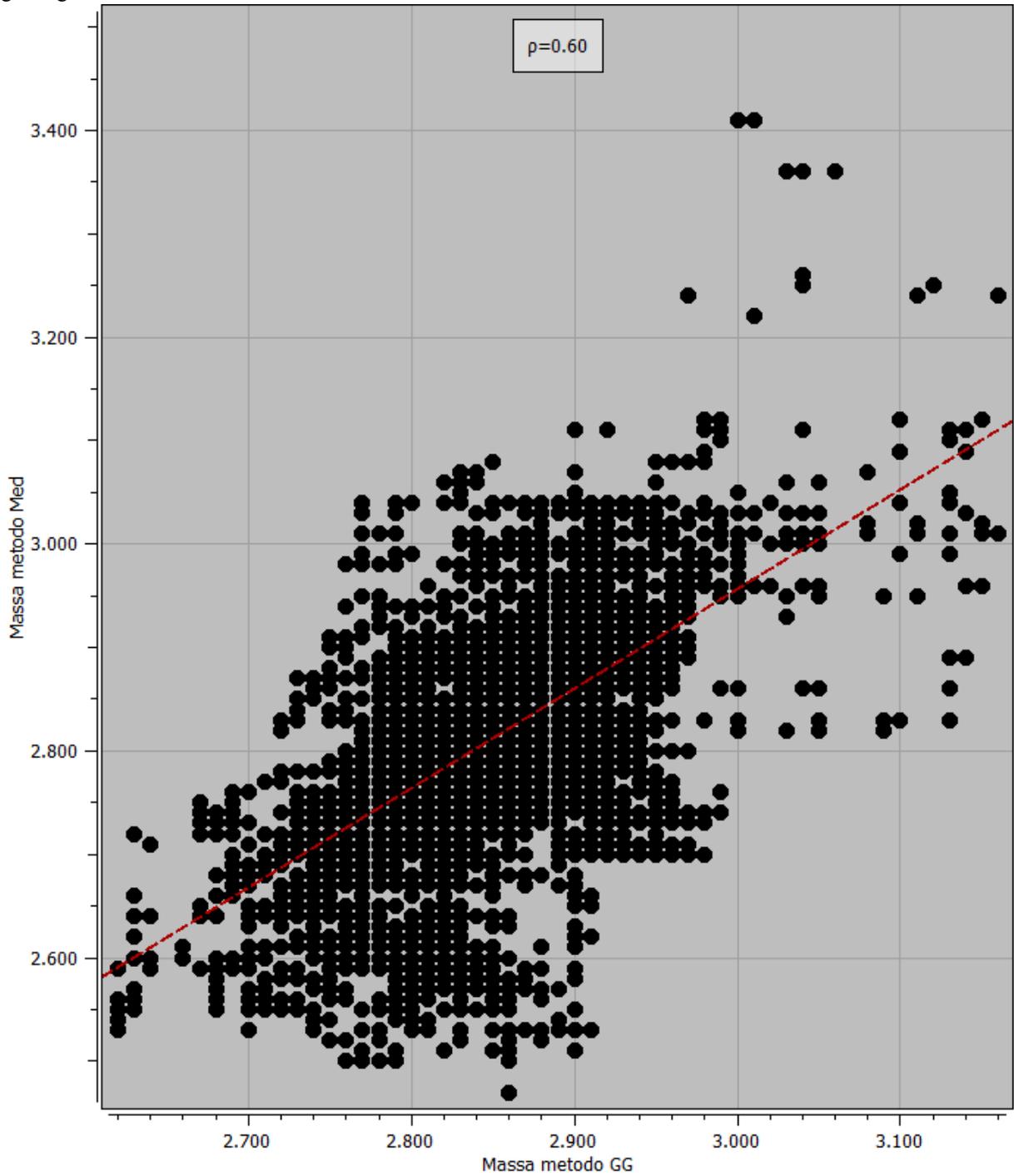
Fonte: elaborado pelo autor utilizando o *software Isatis.neo*.

Figura 109 - *Scatterplot* da densidade estimada dos blocos selecionados do método da perfilagem geofísica gama-gama versus ensaios diretos de laboratório.



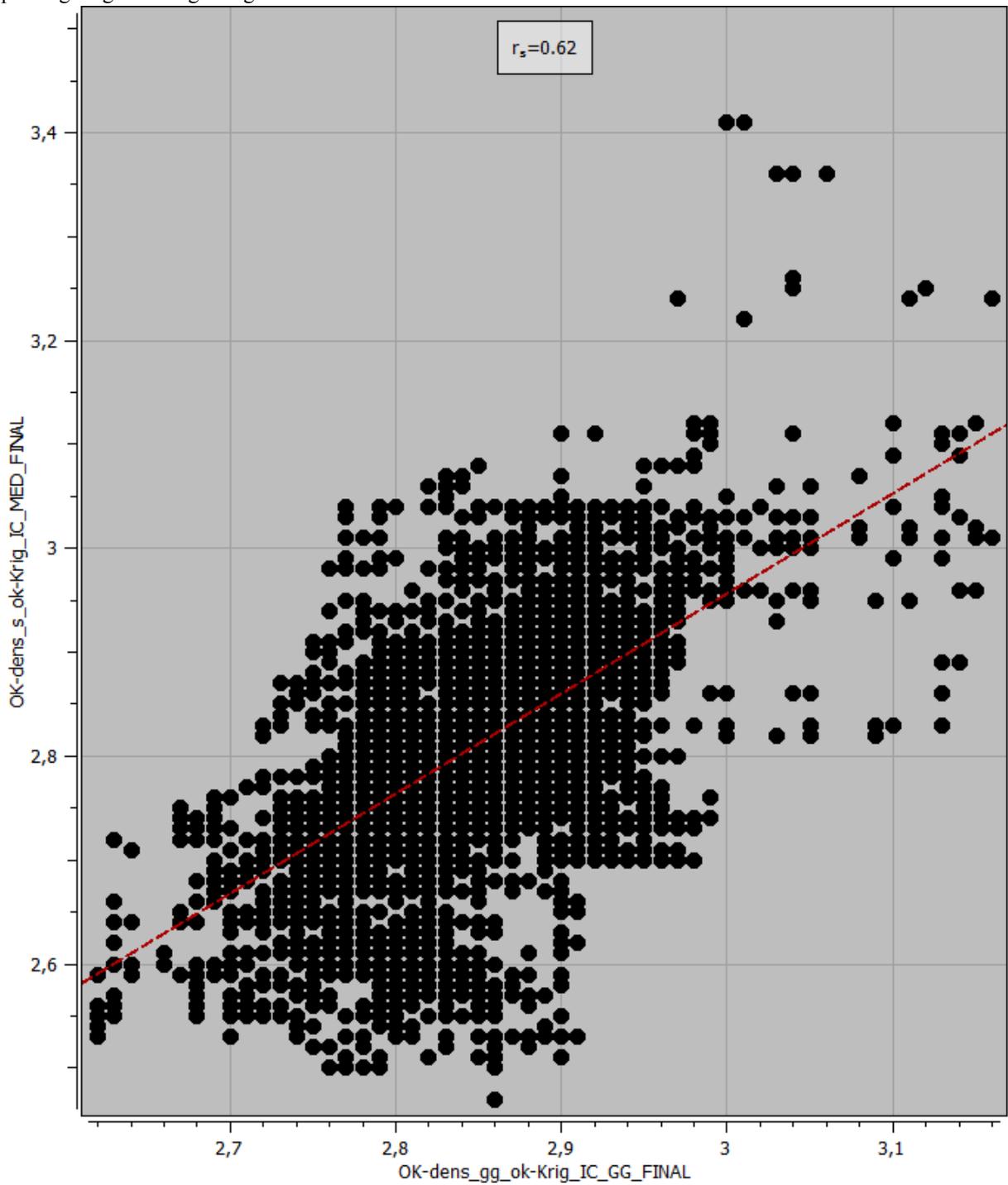
Fonte: elaborado pelo autor utilizando o *software Isatis.neo*.

Figura 110 - *Scatterplot* da massa calculada dos blocos selecionados do método da perfilagem geofísica gama-gama versus ensaios diretos de laboratório.



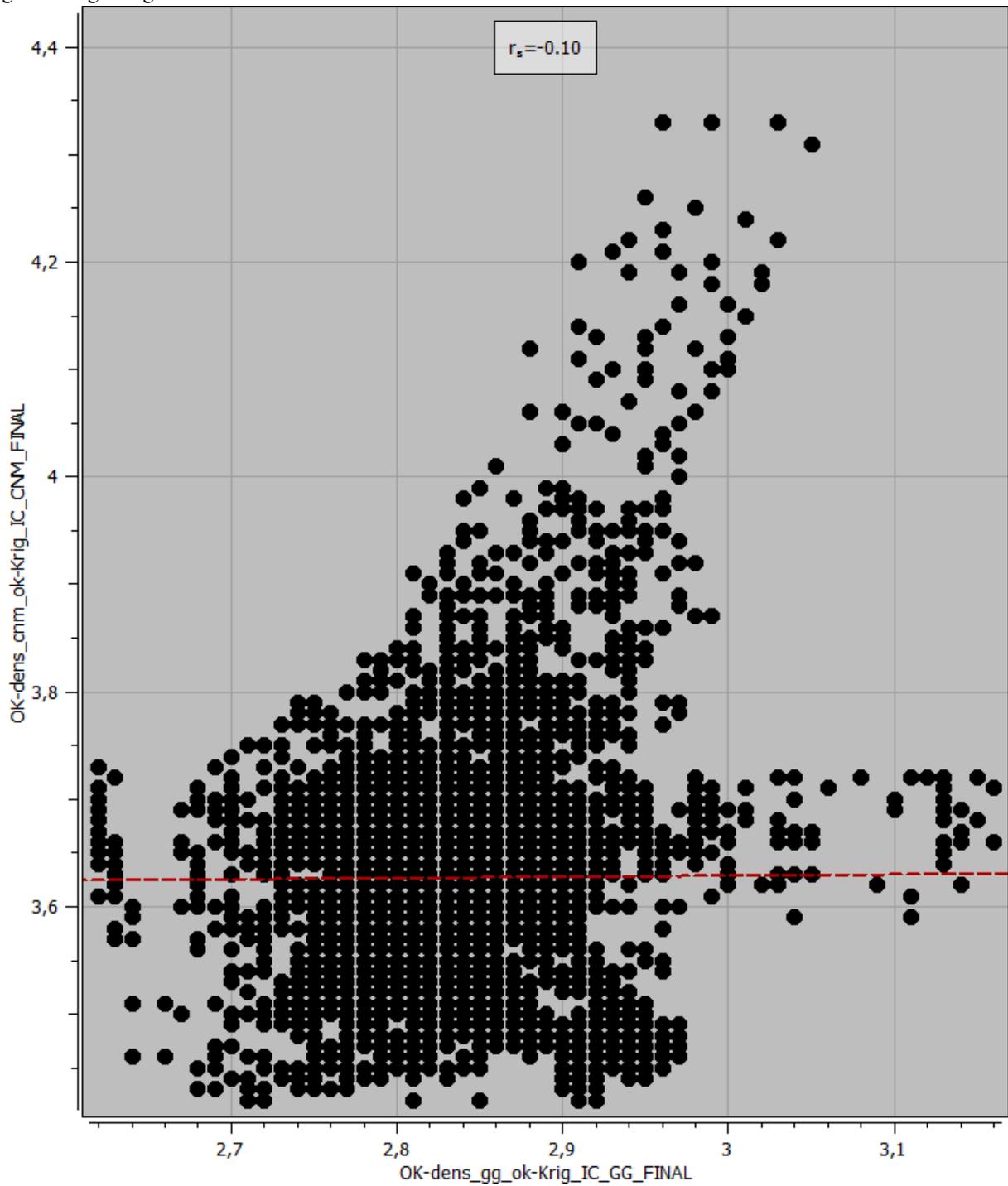
Fonte: elaborado pelo autor utilizando o *software Isatis.neo*.

Figura 111 - Scatterplot do coeficiente de rank da densidade estimada dos blocos selecionados do método da perfilagem geofísica gama-gama versus ensaios diretos de laboratório.



Fonte: elaborado pelo autor utilizando o software *Isatis.neo*.

Figura 112 - Scatterplot do coeficiente de rank da densidade dos blocos selecionados do método da perfilagem geofísica gama-gama versus ensaios diretos de laboratório.



Fonte: elaborado pelo autor utilizando o software *Isatis.neo*.

Tabela 46 - Matriz de correlação da densidade dos blocos selecionados utilizando a perfilagem geofísica gama-gama como base.

	Gama-gama	Ensaio direto	CNM
Gama-gama	1.00	0.60	0.01
Ensaio direto	0.60	1.00	0.10
CNM	0.01	0.10	1.00

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 47 - Matriz de correlação de *rank* da densidade dos blocos selecionados utilizando a perfilagem geofísica gama-gama como base.

	Gama-gama	Ensaio direto	CNM
Gama-gama	1.00	0.62	- 0.10
Ensaio direto	0.62	1.00	0.07
CNM	- 0.10	0.07	1.00

Fonte: elaborado pelo autor.

É possível observar que existe uma correlação entre os valores de densidade do método da perfilagem geofísica gama-gama e os ensaios diretos de laboratório, entretanto nenhum dos dois métodos apresentou correlação com o método do CNM. Outro fator é que por mais que exista essa correlação, a mesma é fraca, sendo o valor de 0.60 o valor mínimo para a existência de correlação. Provavelmente a não existência da correlação entre o CNM e os outros métodos é devido aos dados de densidade do método do CNM terem menor variação e serem mais elevados do que os outros dois métodos. Para poder comparar os valores foi calculada a diferença percentual dos valores de densidade e da massa rochosa, utilizando o gama-gama como base.

Comparando o método da perfilagem geofísica gama-gama com os valores obtidos a partir do relatório da mina, obteve-se uma diferença percentual de -1.31846% para a tonelagem. Isso significa que a massa calculada utilizando os valores do relatório da mina são cerca de 1.32% menores quando comparados com o da perfilagem geofísica gama-gama.

Comparando o método da perfilagem geofísica gama-gama com o método dos ensaios diretos, a diferença percentual da tonelagem foi de -1.36%. Isso significa que tanto a

densidade quanto a massa estimada para o método dos ensaios diretos de laboratório é cerca de 1.36% a menos que para as estimativas do método da perfilagem geofísica gama-gama.

Para o método da perfilagem geofísica gama-gama comparado com o método do CNM a diferença percentual para a tonelagem foi de 27.36%. Logo, tanto a massa quanto a densidade média estimada pelo método do CNM são cerca de 27.37% a mais do que as estimadas pelo método da perfilagem geofísica gama-gama.

Outro fator importante de salientar é que a estimativa que mais se aproximou dos valores de densidade obtidos e descritos no relatório do recurso mineral da mina, foi a estimativa dos ensaios diretos. Os valores de densidade ainda foram consideravelmente diferentes, entretanto, o valor de mínimo foi próximo, mas o valor de máximo foi diferente, sendo maior na estimativa que no relatório. Apesar dessa diferença, para os blocos selecionados o comportamento foi ainda mais parecido, os valores de mínimo ficaram mais distantes, entretanto o valor de densidade médio foi o mesmo, o que acarretou nas massas calculadas levando em consideração os ensaios diretos e a densidade descrita no relatório, serem muito próximas. A diferença percentual foi calculada com o gama-gama de base, mas para evidenciar esse comportamento, foi calculada a diferença percentual entre os ensaios diretos e a massa calculada pela densidade do relatório, sendo o valor de densidade do relatório como base. A diferença percentual foi de -0.04429%.

IF

Para poder comparar as estimativas da litologia IF serão apresentados os sumários, *scatterplots*, matrizes de correlação e diferença percentual utilizando o gama-gama de base.

Tabela 48 - Comparação entre os sumários estatísticos dos valores observados e valores estimados para a litologia IF.

	Média	Variância	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
CNM	3.69	0.05185	0.23	3.01	4.17
CNM estimado	3.69	0.02143	0.15	3.10	4.09
Gama-gama	2.66	0.1012	0.32	1.71	3.59
Gama-gama estimado	2.68	0.04868	0.22	1.99	3.54
Ensaio direto	2.54	0.09579	0.31	1.68	3.48
Ensaio direto estimado	2.56	0.04089	0.20	1.89	3.46
Relatório da mina	2.55	0.01	0.11	2.14	3.00

Fonte: elaborado pelo autor.

Podemos observar que o método do CNM foi o que se aproximou mais dos valores observados dentre todas as estimativas. A média dos dados estimados foi igual a média dos valores observados. Os dados estimados exibiram menor variância e desvio padrão que os valores observados, provavelmente associados ao valor de mínimo estimado ser 0.09 maior que o valor de mínimo observado e o valor máximo estimado ser 0.08 menor que o valor máximo observado.

Para o método da perfilagem geofísica gama-gama, a média estimada foi 0.02 maior que a média observada dos valores. O intervalo de amostras foi menor que os dados observados, sendo o valor mínimo estimado 0.28 maior que o valor mínimo observado e o valor máximo estimado 0.05 menor que o valor máximo observado. Isso significa que os valores de densidade podem estar superestimados nas zonas de baixa densidade do depósito, isto é, os valores baixos de densidade estimados são provavelmente maiores do que os valores observados através da amostragem. Provavelmente o valor de média do valor estimado em

relação à densidade média observada está associado a estes valores de mínimo maiores nos dados estimados do que nos observados.

Quanto aos ensaios diretos de laboratório, os dados estimados possuem comportamento parecido com o método da perfilagem geofísica gama-gama. Isto porque a densidade média foi 0.02 maior na estimativa do que nos valores observados. O valor mínimo da estimativa foi 0.21 maior que o mínimo dos valores observados; já o máximo estimado foi 0.02 menor que o máximo observado. A variância e o desvio padrão da estimativa se mostraram menores que dos dados observados. Da mesma maneira que a estimativa da perfilagem geofísica gama-gama, a diferença entre a média estimada e média observada pode estar associada ao valor de mínimo mais alto na estimativa, quando comparado aos valores observados. As Tabelas 48 e 49 a seguir apresentam o sumário estatístico dos blocos selecionados para a litologia IF e o cálculo da massa rochosa para cada método, respectivamente.

Tabela 49 - Tabela contendo o sumário estatístico apenas dos blocos selecionados.

	Total de blocos	Densidade média	Variância	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
CNM	243016	3.69	0.02128	0.15	3.10	4.09
Gama-Gama	243016	2.69	0.04713	0.22	1.99	3.54
Ensaios diretos	243016	2.57	0.03960	0.20	1.94	3.38

Fonte: elaborado pelo autor.

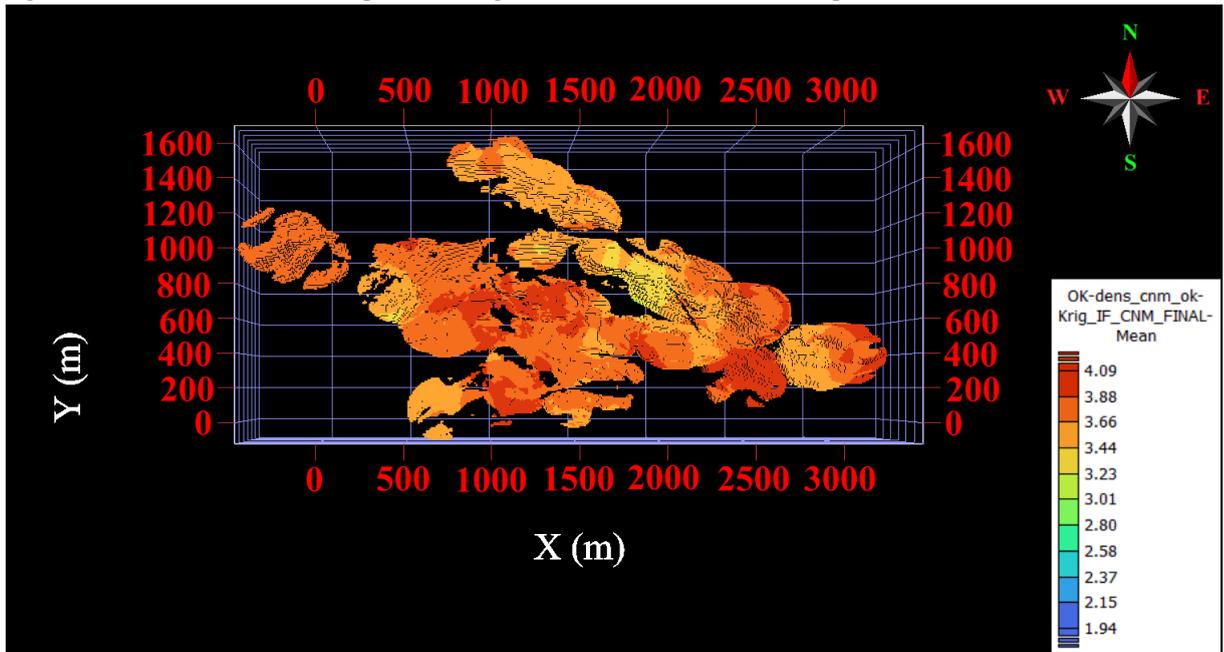
Tabela 50 - Cálculo da massa em toneladas a partir do volume e da densidade média.

	Total de blocos	Volume de cada bloco (m ³)	Massa (ton)
CNM	243016	1000	896,699,830
Gama-Gama	243016	1000	653,186,890
Ensaios diretos	243016	1000	624,174,610
Relatório da mina	243016	1000	619,690,800

Fonte: elaborado pelo autor.

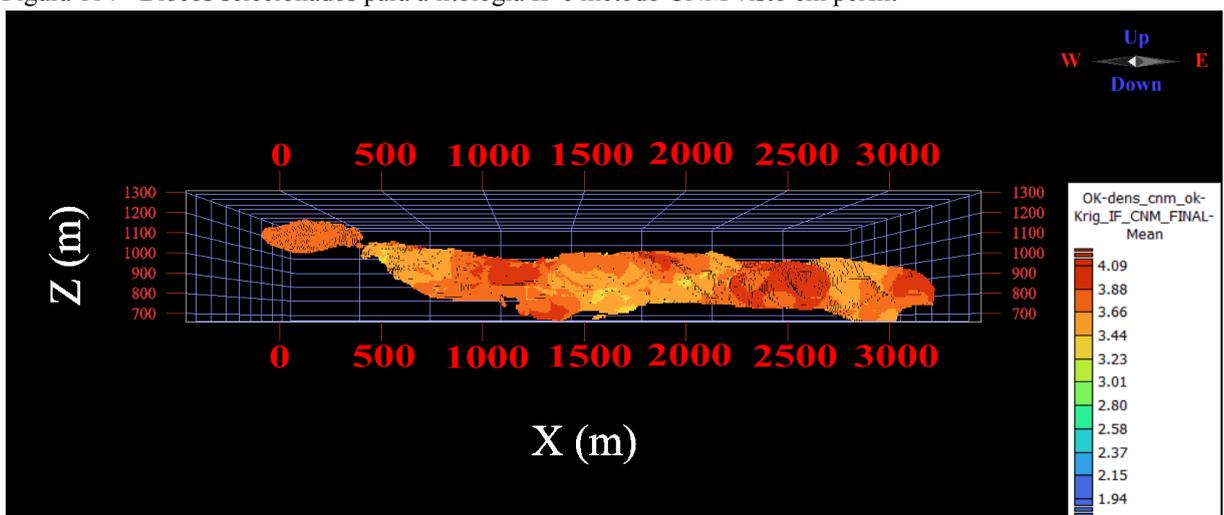
As Figuras 113 - 118 a seguir representam os blocos selecionados para cada um dos métodos vistos em planta e em perfil. Já as Figuras 119 - 124 abaixo apresentam os *scatterplots* para a densidade estimada e massa calculada dos blocos selecionados utilizando o gama-gama como a variável independente.

Figura 113 - Blocos selecionados para a litologia IF e método CNM visto em planta.



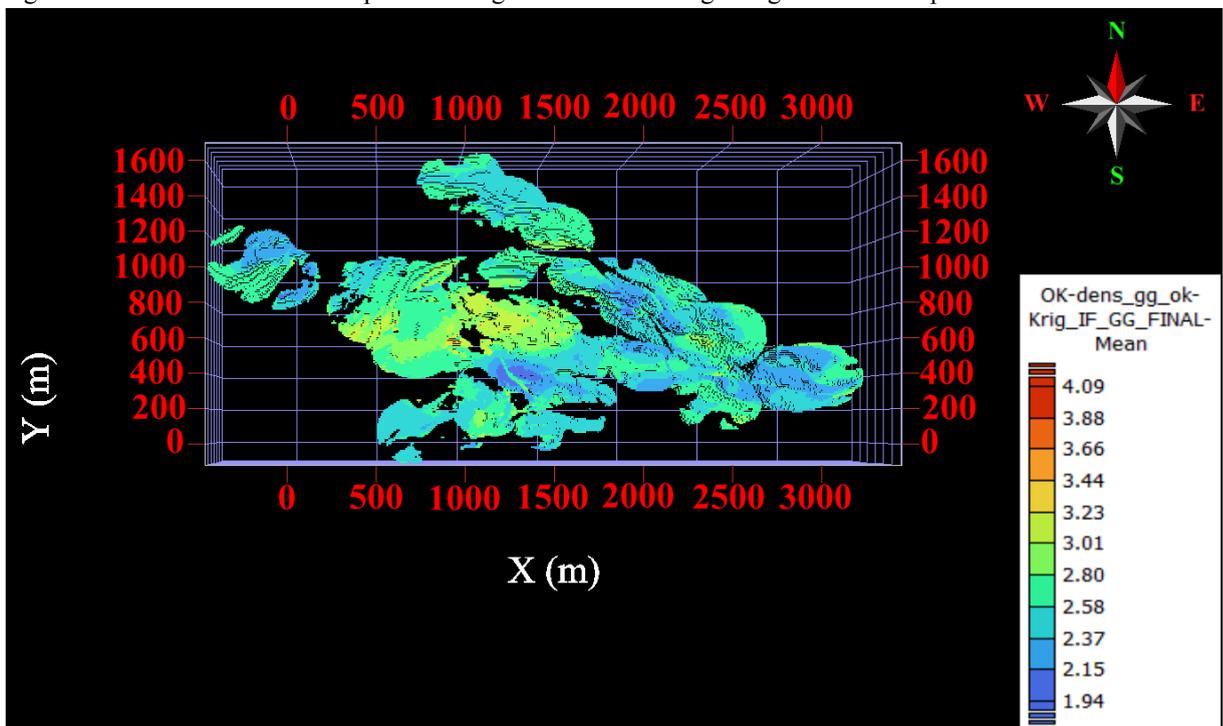
Fonte: elaborado pelo autor utilizando o *software Isatis.neo*.

Figura 114 - Blocos selecionados para a litologia IF e método CNM visto em perfil.



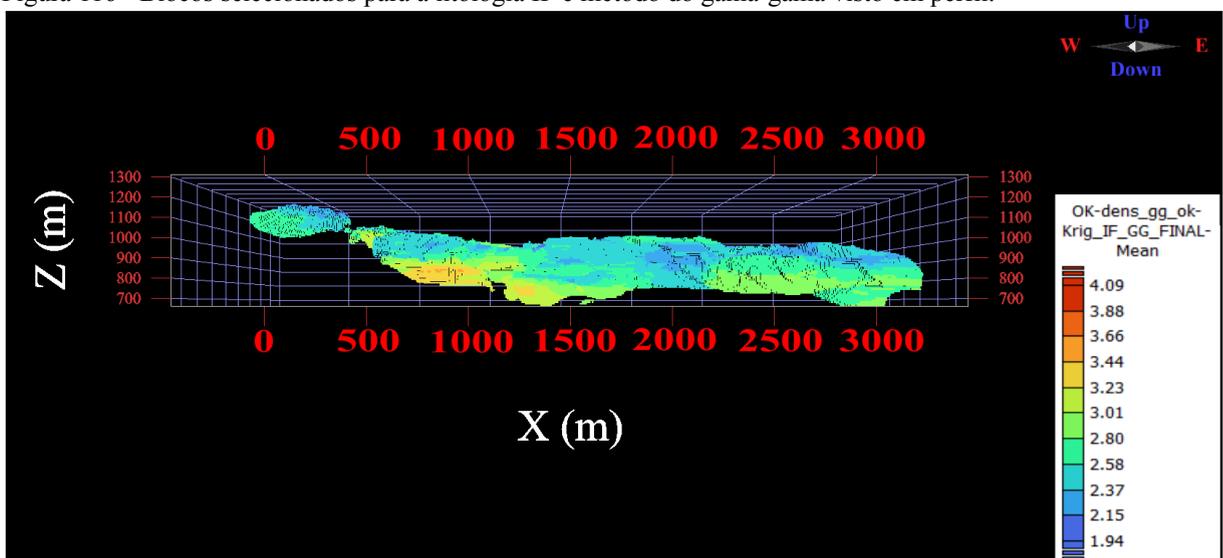
Fonte: elaborado pelo autor utilizando o *software Isatis.neo*.

Figura 115 - Blocos selecionados para a litologia IF e método do gama-gama visto em planta.



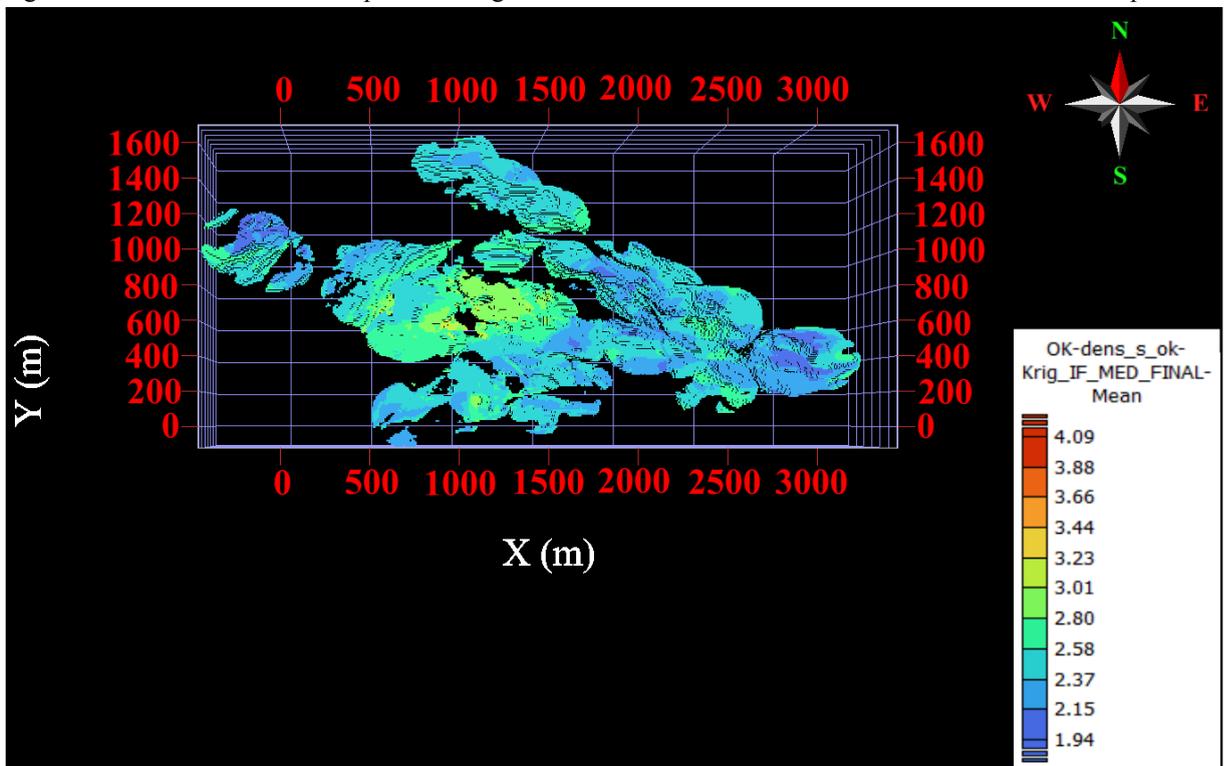
Fonte: elaborado pelo autor utilizando o *software Isatis.neo*.

Figura 116 - Blocos selecionados para a litologia IF e método do gama-gama visto em perfil.



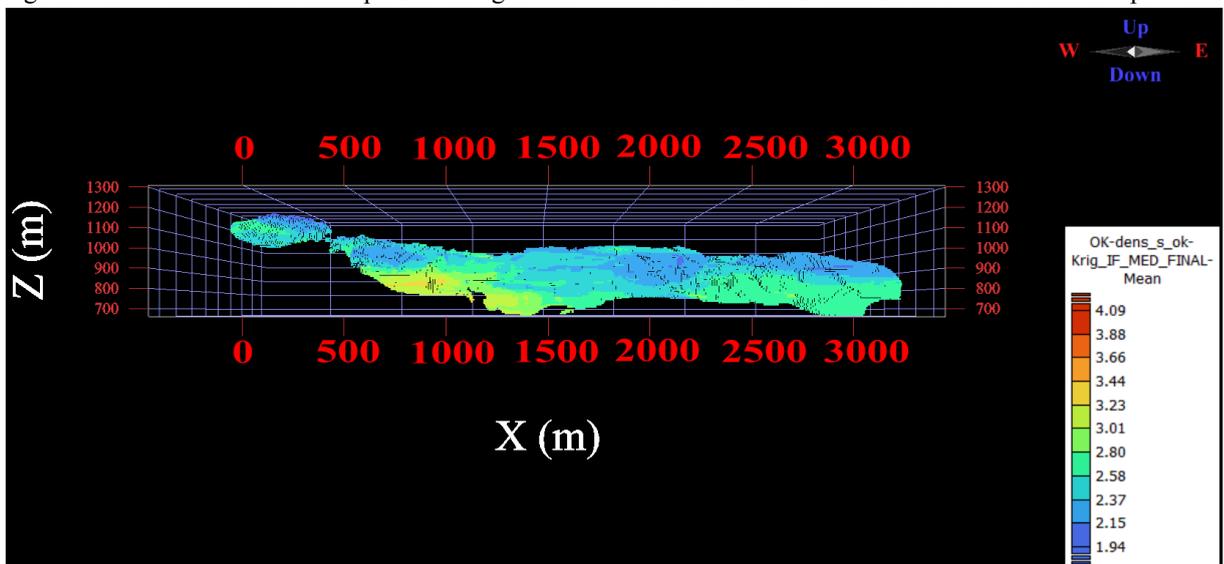
Fonte: elaborado pelo autor utilizando o *software Isatis.neo*.

Figura 117 - Blocos seleccionados para a litologia IF e método dos ensaios diretos de laboratório visto em planta.



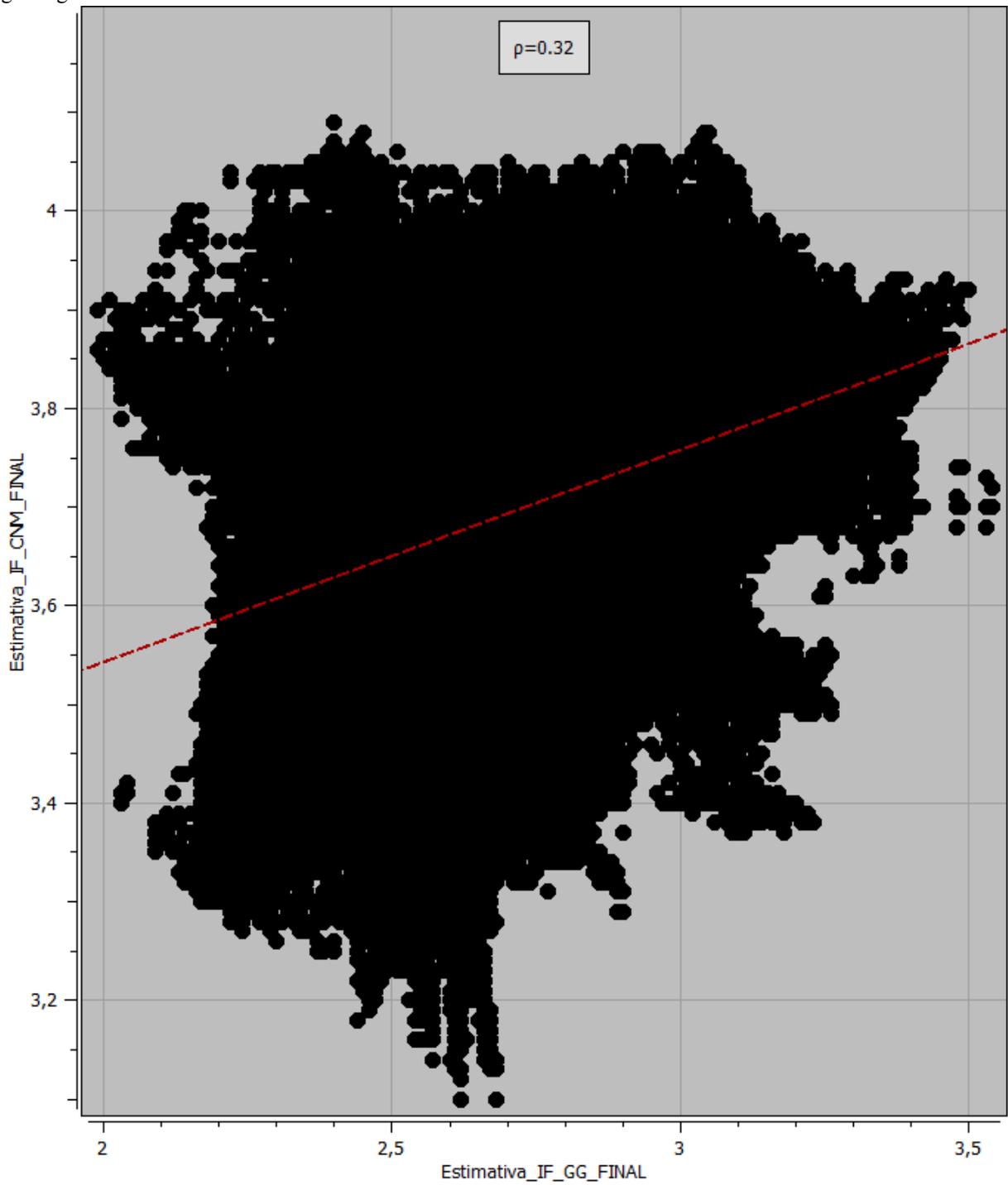
Fonte: elaborado pelo autor utilizando o *software Isatis.neo*.

Figura 118 - Blocos seleccionados para a litologia IF e método dos ensaios diretos de laboratório visto em perfil.



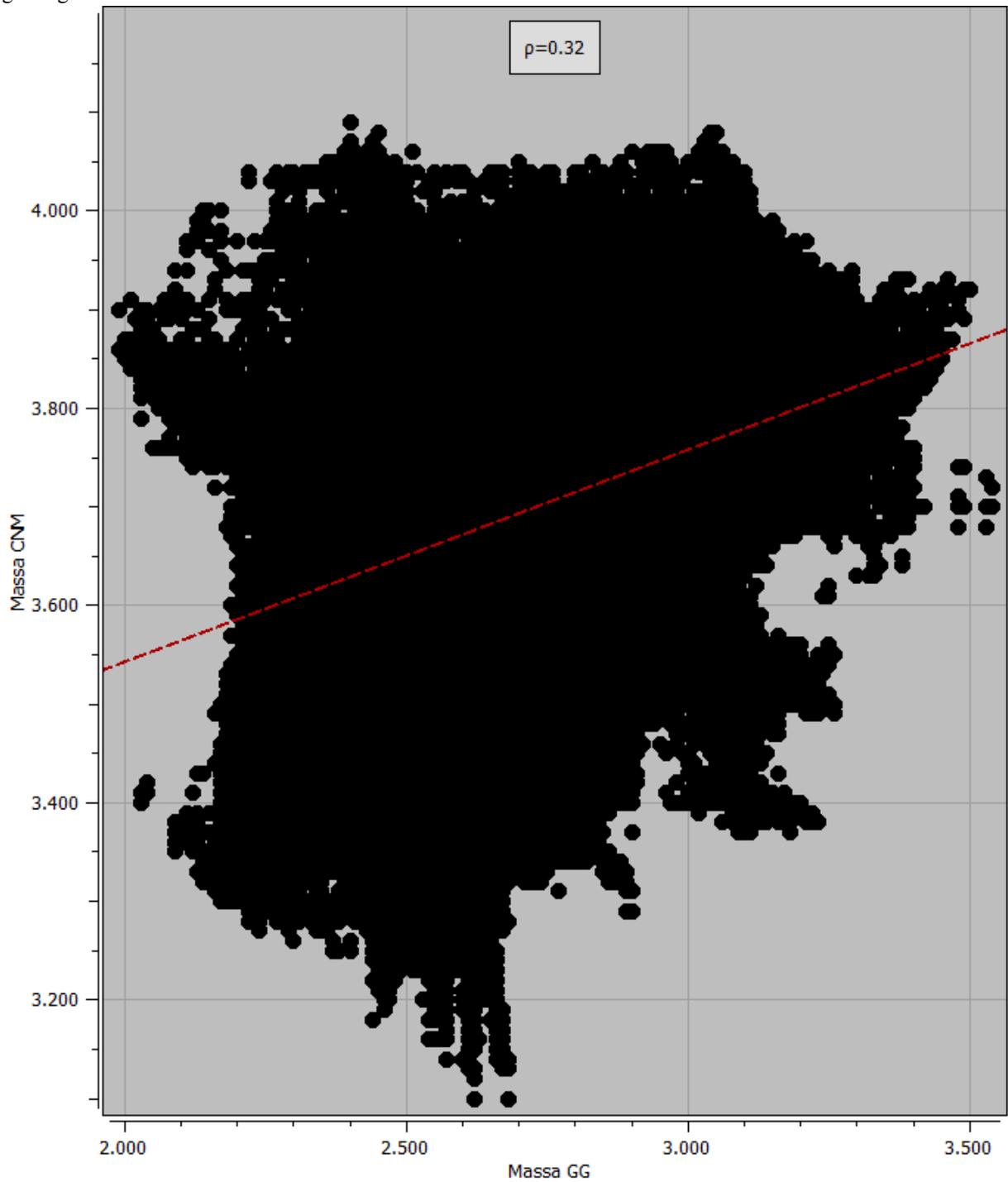
Fonte: elaborado pelo autor utilizando o *software Isatis.neo*.

Figura 119 - *Scatterplot* da densidade estimada dos blocos seleccionados do método da perfilagem geofísica gama-gama versus CNM.



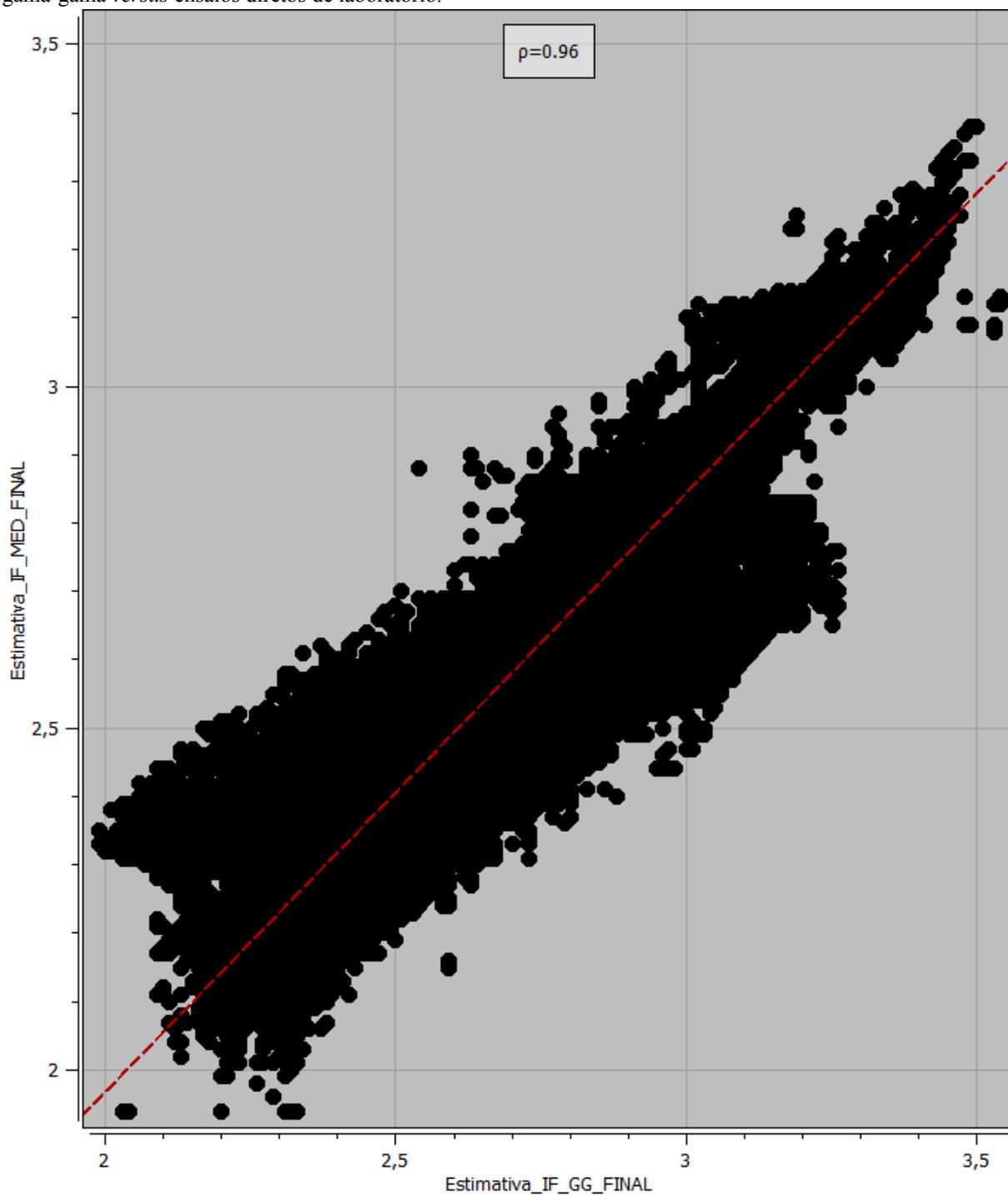
Fonte: elaborado pelo autor utilizando o *software Isatis.neo*.

Figura 120 - *Scatterplot* da massa calculada dos blocos selecionados do método da perfilagem geofísica gama-gama versus CNM.



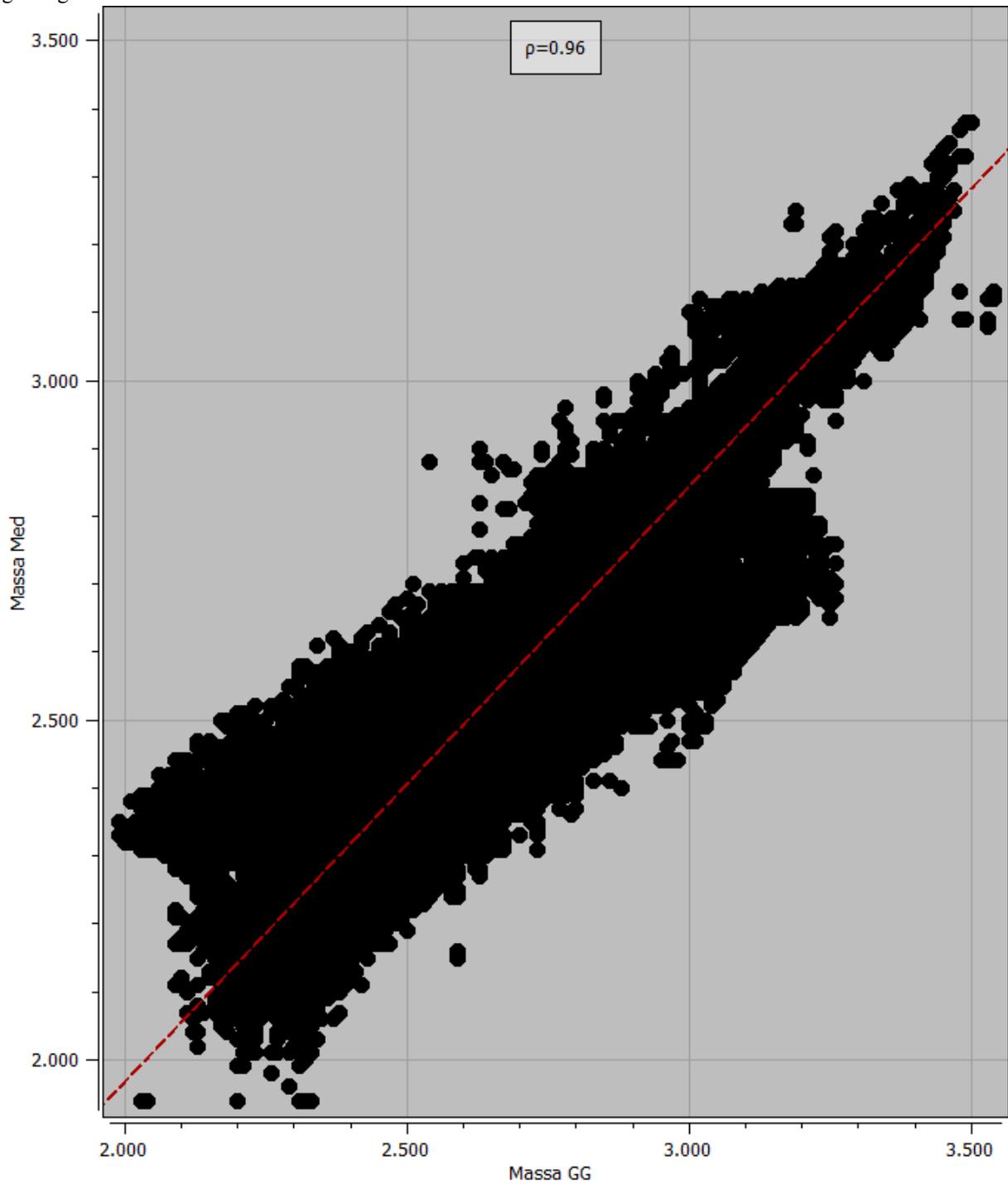
Fonte: elaborado pelo autor utilizando o *software Isatis.neo*.

Figura 121 - *Scatterplot* da densidade estimada dos blocos selecionados do método da perfilagem geofísica gama-gama versus ensaios diretos de laboratório.



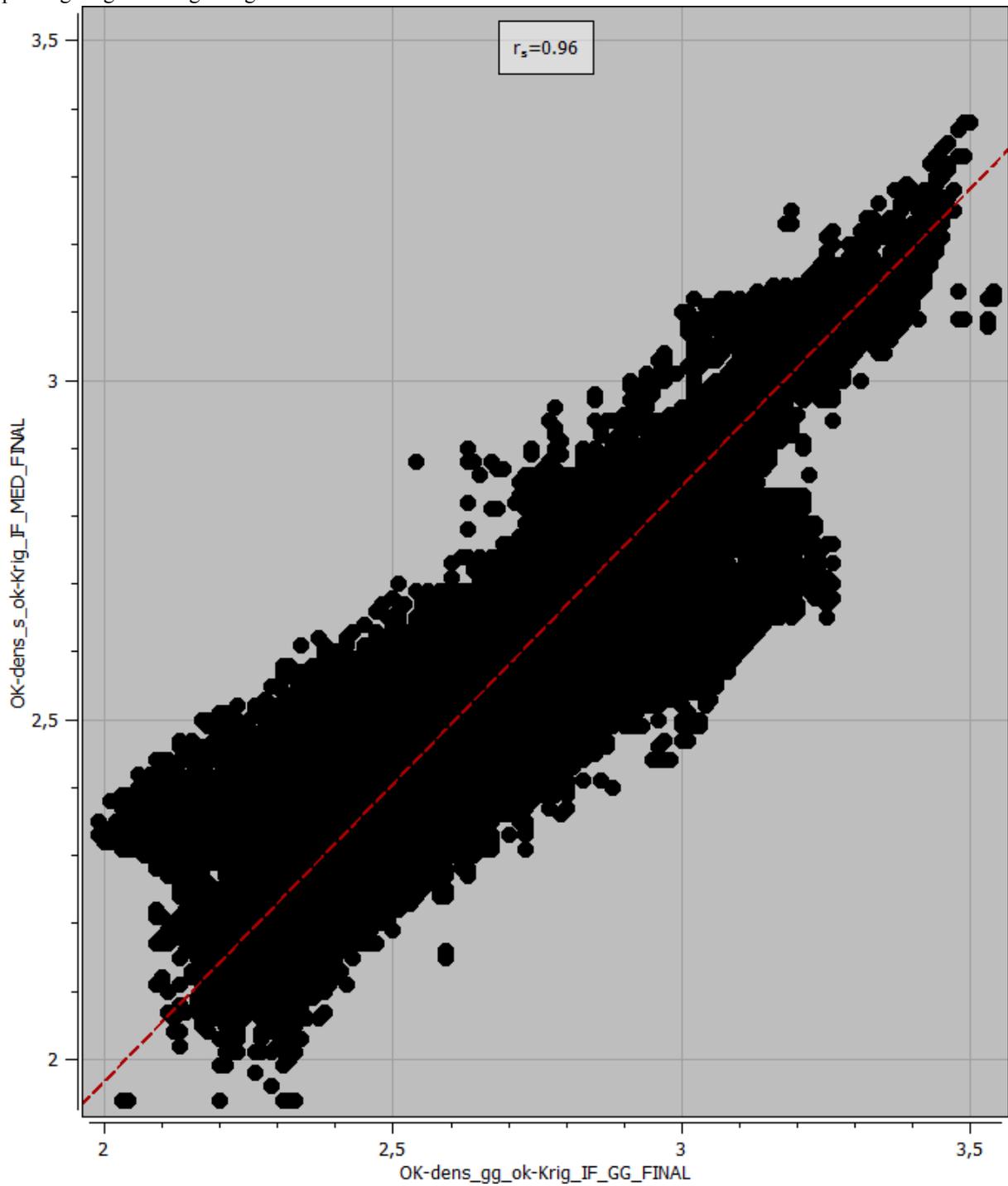
Fonte: elaborado pelo autor utilizando o *software Isatis.neo*.

Figura 122 - *Scatterplot* da massa calculada dos blocos selecionados do método da perfilagem geofísica gama-gama *versus* ensaios diretos de laboratório.



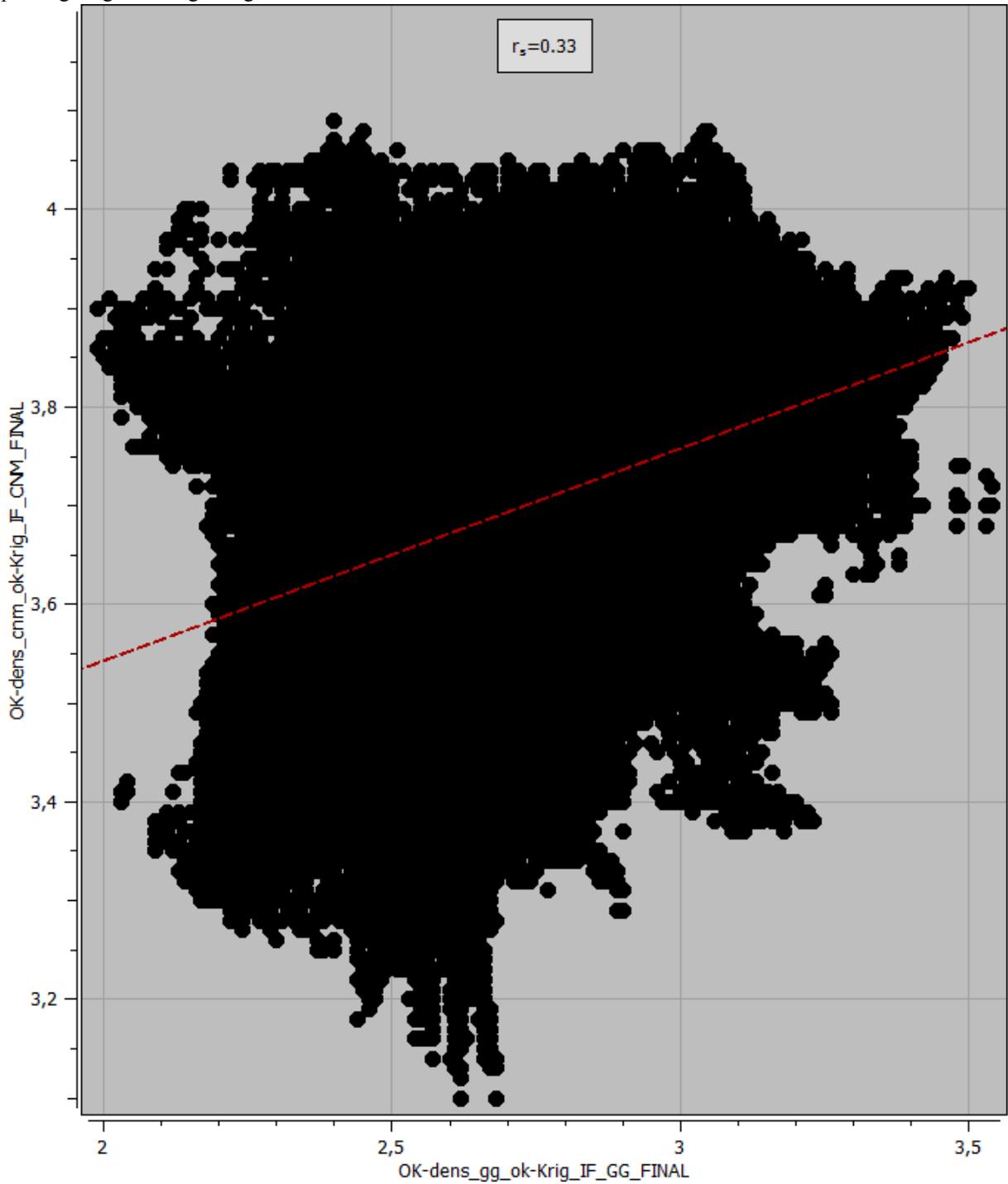
Fonte: elaborado pelo autor utilizando o *software Isatis.neo*.

Figura 123 - Scatterplot do coeficiente de rank da densidade estimada dos blocos selecionados do método da perfilagem geofísica gama-gama versus CNM.



Fonte: elaborado pelo autor utilizando o software *Isatis.neo*.

Figura 124 - Scatterplot do coeficiente de *rank* da densidade estimada dos blocos selecionados do método da perfilagem geofísica gama-gama versus ensaios diretos de laboratório.



Fonte: elaborado pelo autor utilizando o software *Isatis.neo*.

As Tabelas 50 e 51 a seguir representam a matriz de correlação linear e de *rank* da densidade dos blocos selecionados, utilizando o método do gama-gama como base.

Tabela 50 - Matriz de correlação da densidade dos blocos selecionados utilizando a perfilagem geofísica gama-gama como base.

	Gama-gama	Ensaio direto	CNM
Gama-gama	1.00	0.96	0.32
Ensaio direto	0.96	1.00	0.32
CNM	0.32	0.32	1.00

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 51 - Matriz de correlação da densidade dos blocos selecionados utilizando a perfilagem geofísica gama-gama como base e utilizando o coeficiente de correlação de *rank*.

	Gama-gama	Ensaio direto	CNM
Gama-gama	1.00	0.96	0.33
Ensaio direto	0.96	1.00	0.33
CNM	0.33	0.33	1.00

Fonte: elaborado pelo autor.

É possível observar que existe uma correlação forte entre os dados estimados para o método do gama-gama e para o método dos ensaios diretos de laboratório, isso porque o valor máximo do coeficiente de correlação linear é 1.00 e a correlação foi de 0.96. O método do CNM não apresentou correlação com nenhum dos métodos, mas apresentou coeficiente de correlação maior que para a litologia IC. Provavelmente este aumento no coeficiente de correlação está associado ao número maior de blocos em comum, permitindo a comparação de mais valores, uma vez que os blocos em comum para a litologia IC contou com 6315 blocos e o IF com mais de 240000 blocos.

A diferença percentual entre o método do gama-gama e os ensaios diretos de laboratório foi de -4.44% para a tonelagem. Logo, tanto a densidade quanto a massa estimada para o método dos ensaios diretos de laboratório é cerca de 4.46% menor que para o método da perfilagem geofísica gama-gama.

Já quando comparado com o CNM, a diferença percentual é de 37.28% para a tonelagem. Logo, tanto a massa quanto a densidade estimadas para o método do CNM é de 37.28% maior que aquela estimada para o método da perfilagem geofísica gama-gama.

Comparando a perfilagem geofísica gama-gama com o valor de densidade descrito no relatório da mina, obteve-se uma diferença de -5.1281% para as tonelagens. Isso significa que a densidade e a massa são cerca de 5.13% menores do que as calculadas para o método da perfilagem geofísica gama-gama.

Novamente a estimativa que mostrou comportamento mais similar àquele descrito no relatório da mina foi dos ensaios diretos. Isso fica evidente apenas analisando as diferenças percentuais de ambos com o método da perfilagem geofísica gama-gama, onde um foi -4.44% e outro -5.13%. Além do mais, para a litologia IF os valores de média foram próximos tanto nos blocos selecionados, mas também considerando o total da estimativa. Os valores de mínimo são próximos, mas os valores de máximo estimados são maiores que aqueles descritos no relatório. A diferença percentual entre o método dos ensaios diretos de laboratório e dos valores de densidade descritos no relatório é de 0.7235%. Isto significa que os valores estão próximos, mas os valores relacionados ao método dos ensaios diretos de laboratório são maiores que para a densidade descrita no relatório da mina.

IFR

Para a litologia IFR o sumário estatístico das estimativas e valores observados, *scatterplots*, sumário estatístico dos blocos selecionados, cálculo das massas rochosas e matriz de correlação estão apresentados a seguir.

Tabela 52 - Comparação entre os sumários estatísticos dos valores observados e valores estimados para a litologia IFR.

	Média	Variância	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
CNM	4.27	0.01439	0.12	4.06	4.64
CNM estimado	4.25	0.006324	0.08	4.07	4.56
Gama-gama	2.71	0.1046	0.32	2.02	3.56
Gama-gama estimado	2.90	0.07961	0.28	2.28	3.40
Ensaio direto	2.60	0.09897	0.31	1.77	3.40
Ensaio direto estimado	2.62	0.05698	0.24	1.89	3.31
Relatório da mina	2.92	0.00	0.07	2.68	3.22

Fonte: elaborado pelo autor.

Podemos observar que para o método do CNM a média estimada foi 0.02 menor que a média observada. Os valores de mínimo foram próximos, sendo o estimado 0.01 maior que o observado. Para o valor máximo a diferença da estimativa foi 0.08 menor que os valores observados. A variância e o desvio padrão são menores na estimativa do que nos valores observados.

Para o método da perfilagem geofísica gama-gama a média foi bem diferente, sendo a média estimada 0.19 maior que a média observada. Além do mais, o valor mínimo estimado foi 0.26 maior que o valor mínimo observado. Já o valor máximo estimado foi 0.16 menor que o valor máximo observado. A diferença entre a média observada e a média estimada foi muito grande.

No que diz respeito ao método dos ensaios diretos de laboratório, a média estimada foi maior que a média observada em 0.02. O valor mínimo estimado foi 0.12 maior que o observado, já o valor máximo estimado foi 0.09 menor que o valor máximo observado. Tanto a variância quanto o desvio padrão foram menores na estimativa do que os valores observados. As Tabelas 52 e 53 a seguir apresentam o sumário estatístico da variável densidade para os blocos selecionados e o cálculo das massas rochosas, respectivamente.

Tabela 53 - Tabela contendo o sumário estatístico apenas dos blocos selecionados.

	Total de blocos	Densidade média	Variância	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
CNM	9964	4.27	0.00399	0.06	4.08	4.52
Gama-Gama	9964	2.93	0.07032	0.27	2.28	3.40
Ensaio diretos	9964	2.78	0.05824	0.24	2.06	3.24

Fonte: elaborado pelo autor.

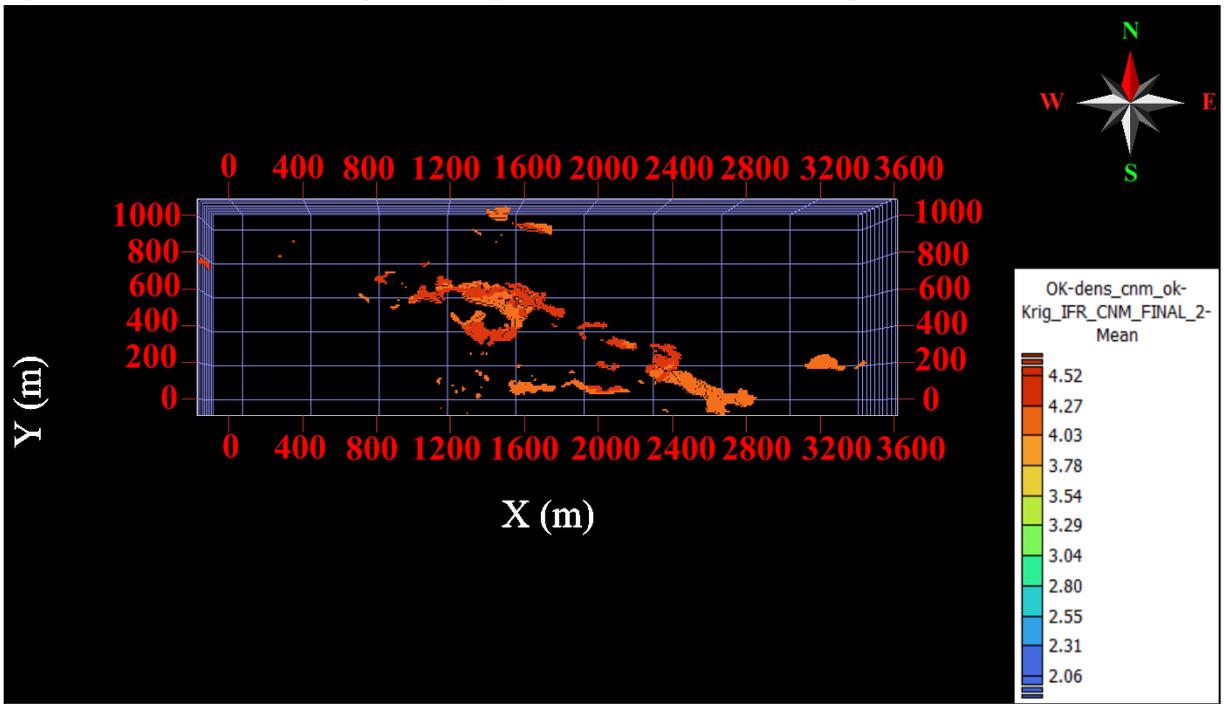
Tabela 54 - Cálculo da massa em toneladas a partir do volume e da densidade média.

	Total de blocos	Volume de cada bloco (m ³)	Massa (ton)
CNM	9964	1000	42,545,420
Gama-Gama	9964	1000	29,218,120
Ensaio diretos	9964	1000	27,718,770
Relatório da mina	9964	1000	29,094,880

Fonte: elaborado pelo autor.

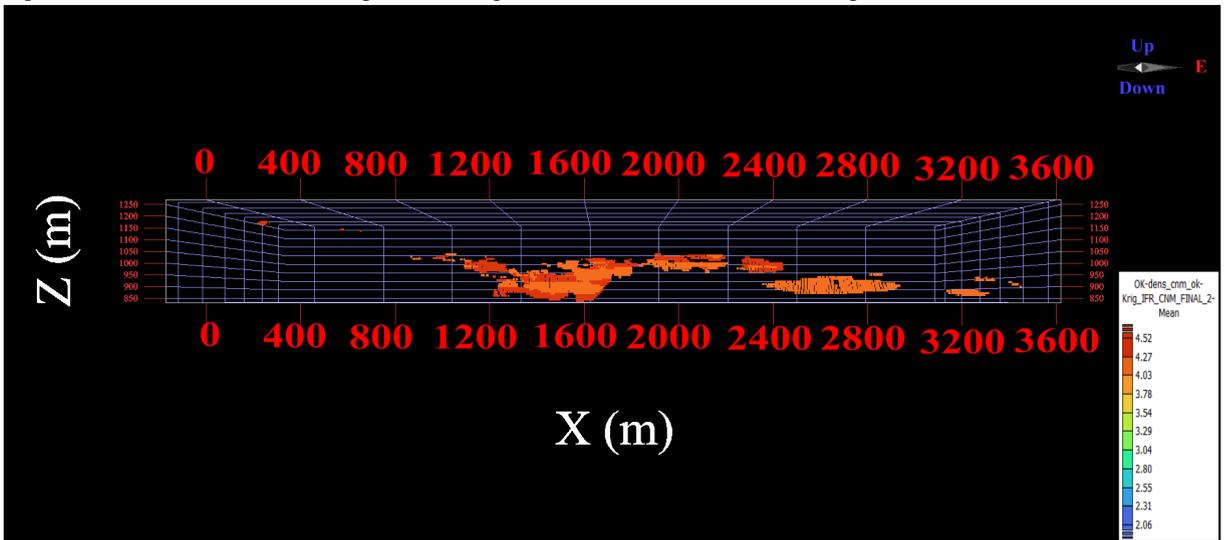
As Figuras 125 - 130 a seguir representam os blocos selecionados para cada método diferente vistos em planta e em perfil, apresentados na mesma ordem que as Tabelas que antecedem. As Figuras 131 - 136 abaixo representam os *scatterplots* para a densidade estimada e massa calculada dos blocos selecionados utilizando o método do gama-gama como a variável independente. As Tabelas 55 e 56 representam a matriz de correlação entre os três métodos utilizando o método do gama-gama como base tanto para o coeficiente de Pearson quanto de Spearman.

Figura 125 - Blocos seleccionados para a litologia IFR e método CNM visto em planta.



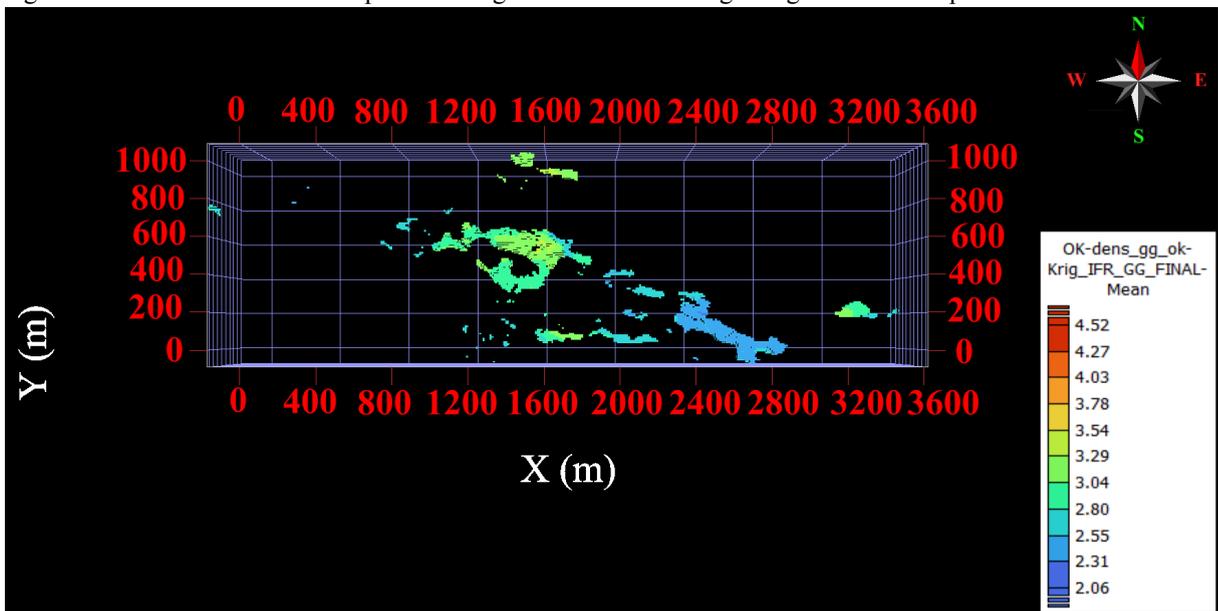
Fonte: elaborado pelo autor utilizando o *software Isatis.neo*.

Figura 126 - Blocos seleccionados para a litologia IFR e método CNM visto em perfil.



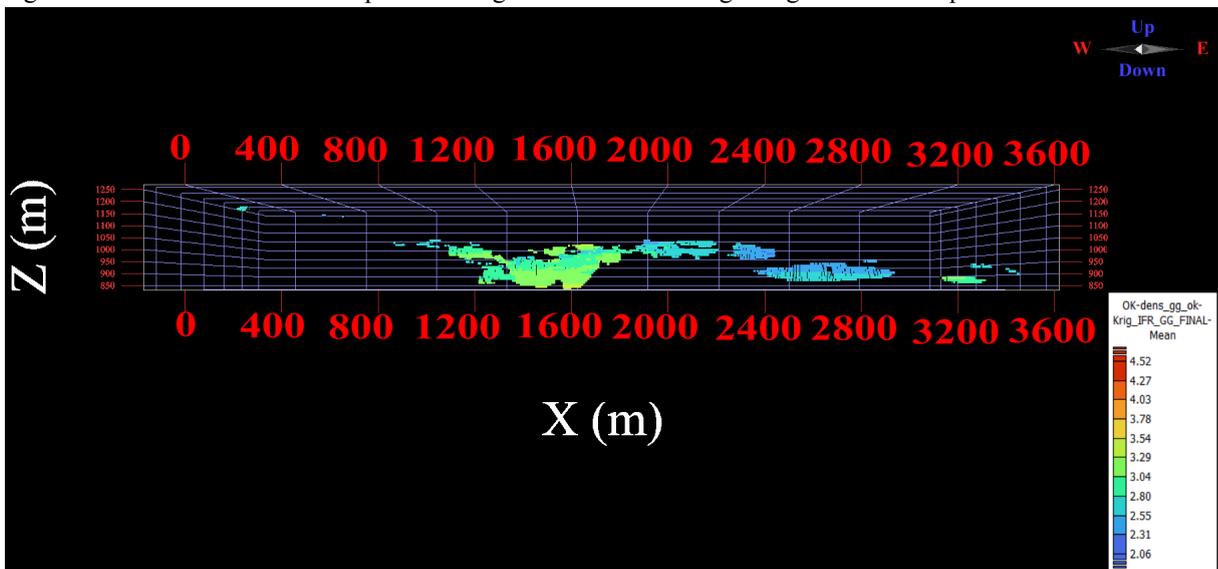
Fonte: elaborado pelo autor utilizando o *software Isatis.neo*.

Figura 127 - Blocos seleccionados para a litologia IFR e método do gama-gama visto em planta.



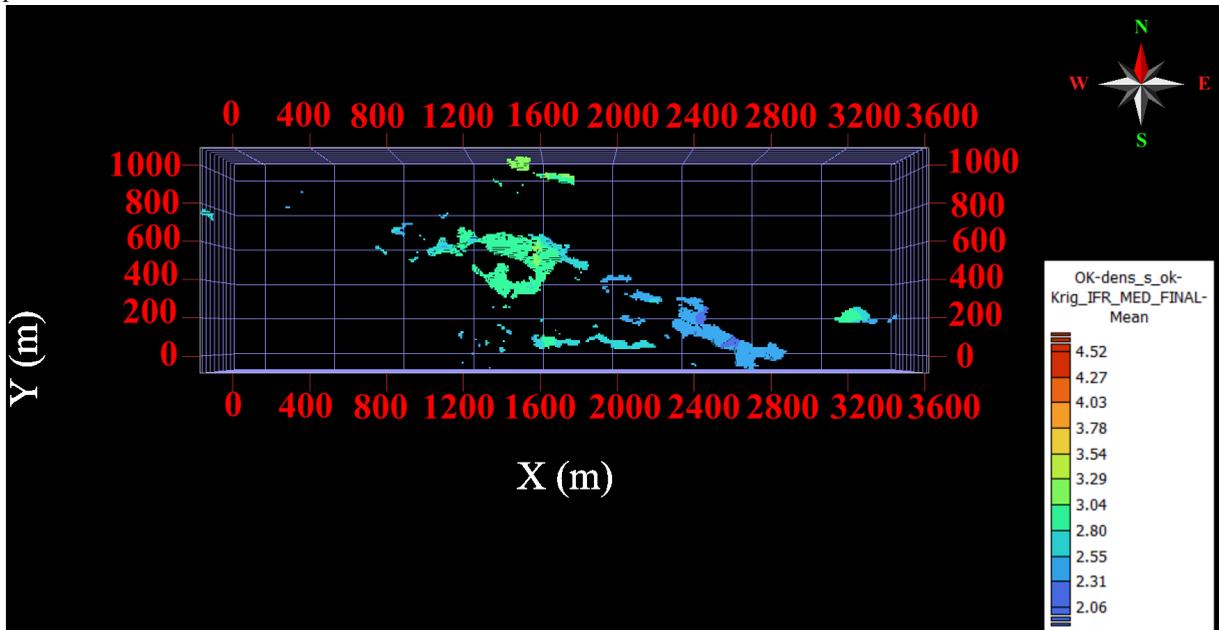
Fonte: elaborado pelo autor utilizando o *software Isatis.neo*.

Figura 128 - Blocos seleccionados para a litologia IFR e método do gama-gama visto em perfil.



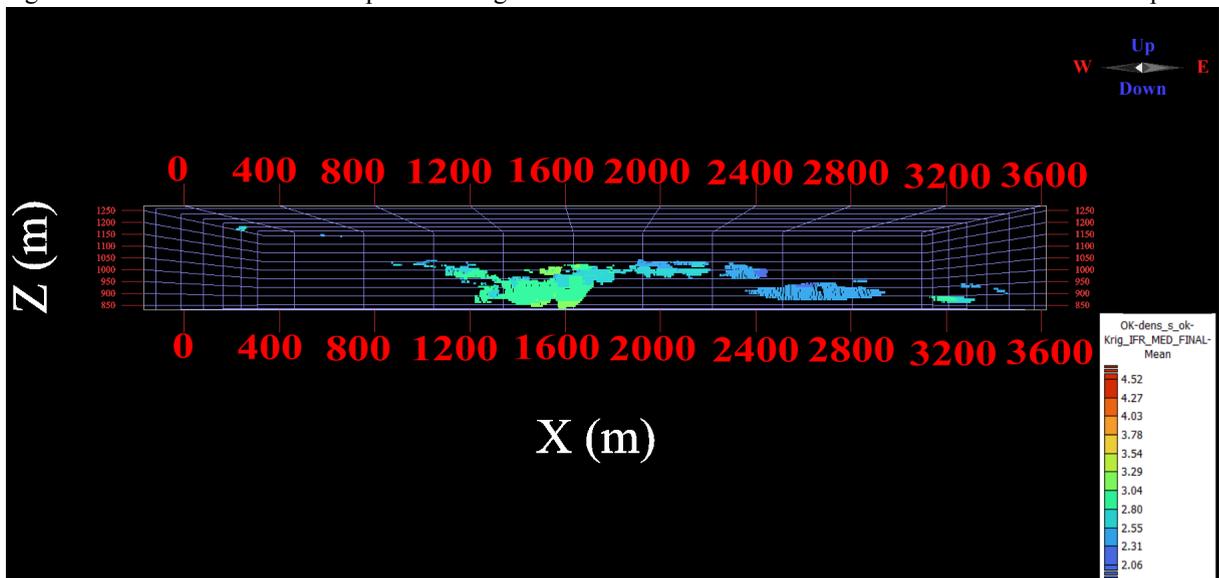
Fonte: elaborado pelo autor utilizando o *software Isatis.neo*.

Figura 129 - Blocos selecionados para a litologia IFR e método dos ensaios diretos de laboratório visto em planta.



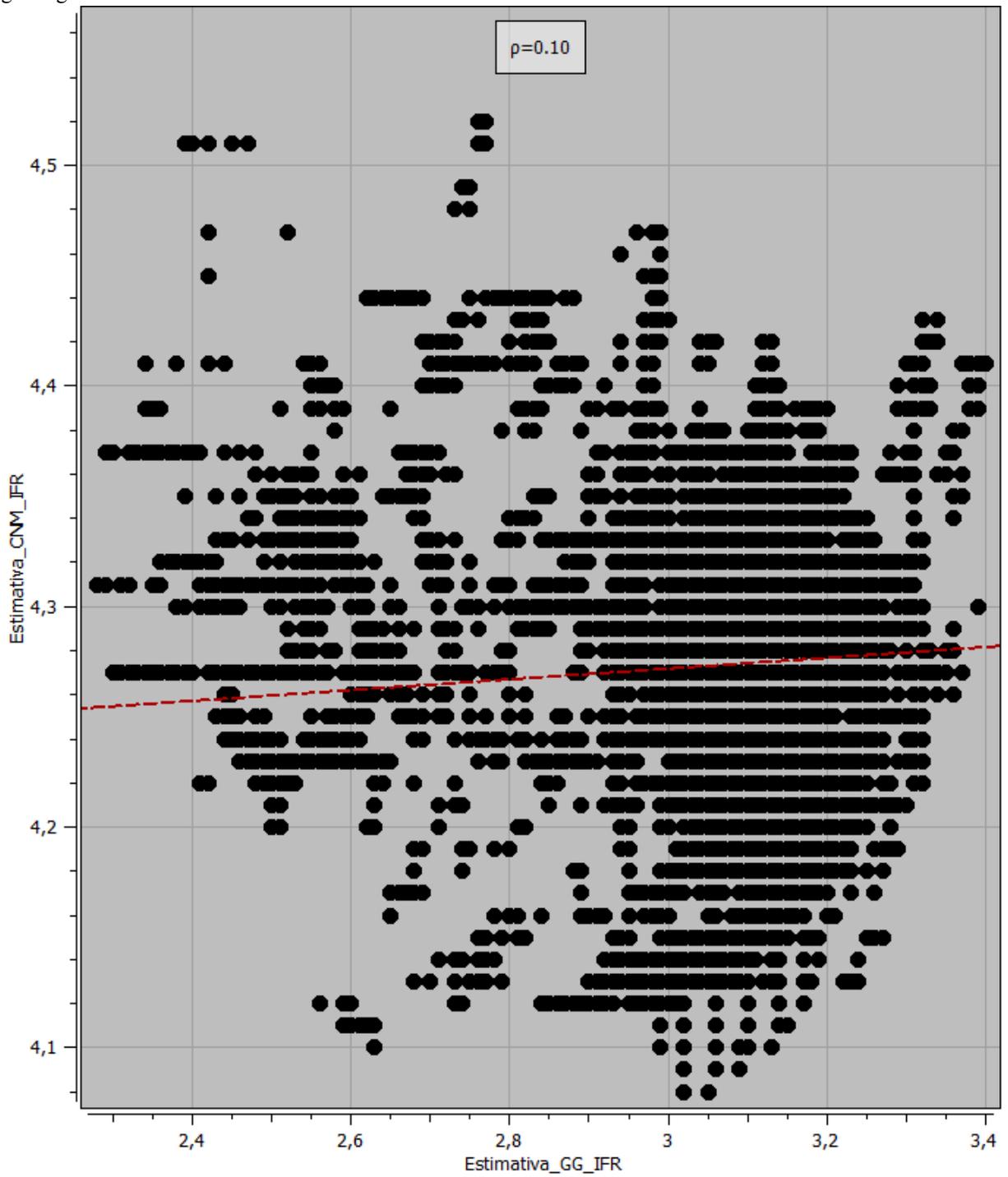
Fonte: elaborado pelo autor utilizando o *software Isatis.neo*.

Figura 130 - Blocos selecionados para a litologia IFR e método dos ensaios diretos de laboratório visto em perfil.



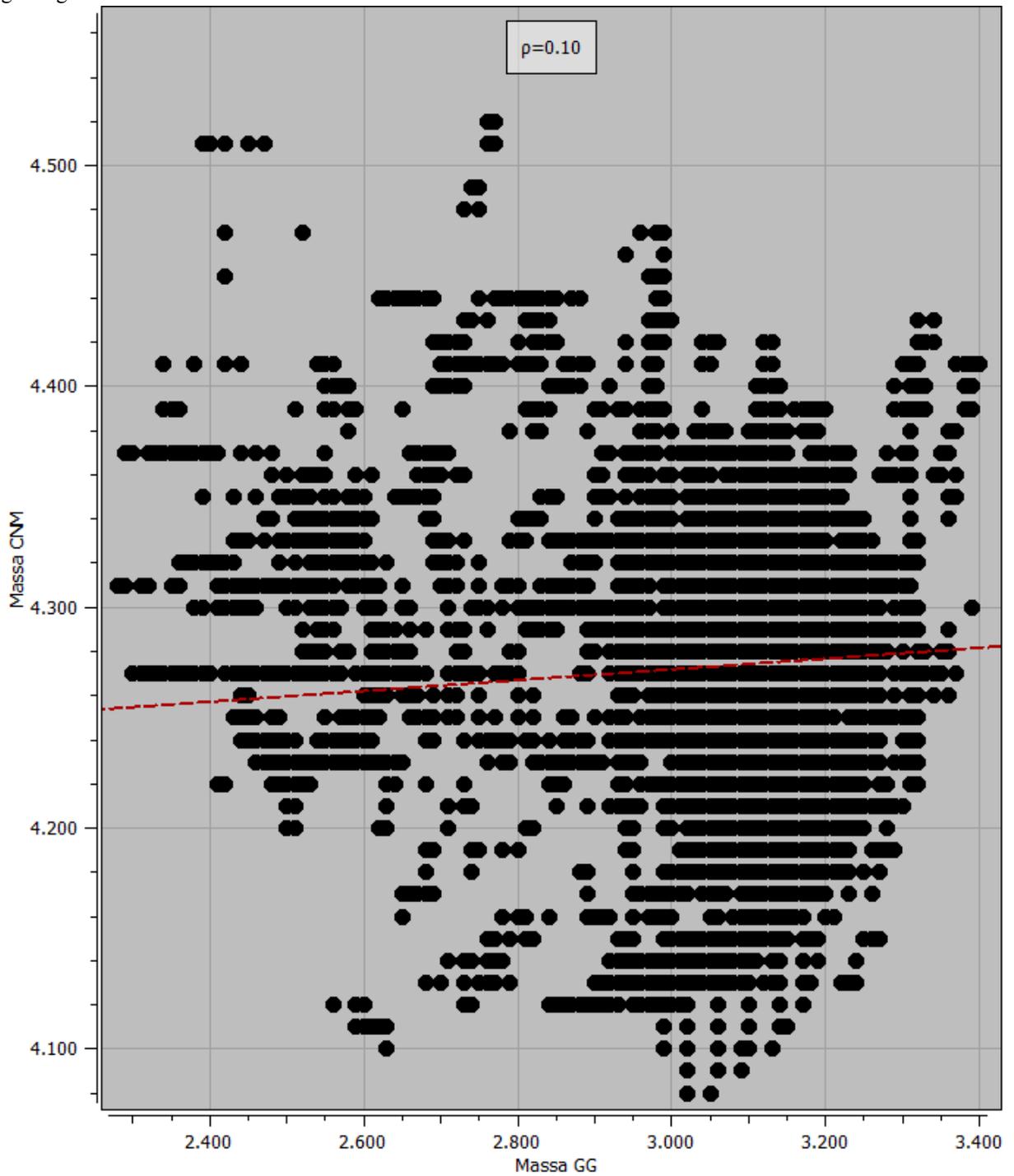
Fonte: elaborado pelo autor utilizando o *software Isatis.neo*.

Figura 131 - Scatterplot da densidade estimada dos blocos selecionados do método da perfilagem geofísica gama-gama versus CNM.



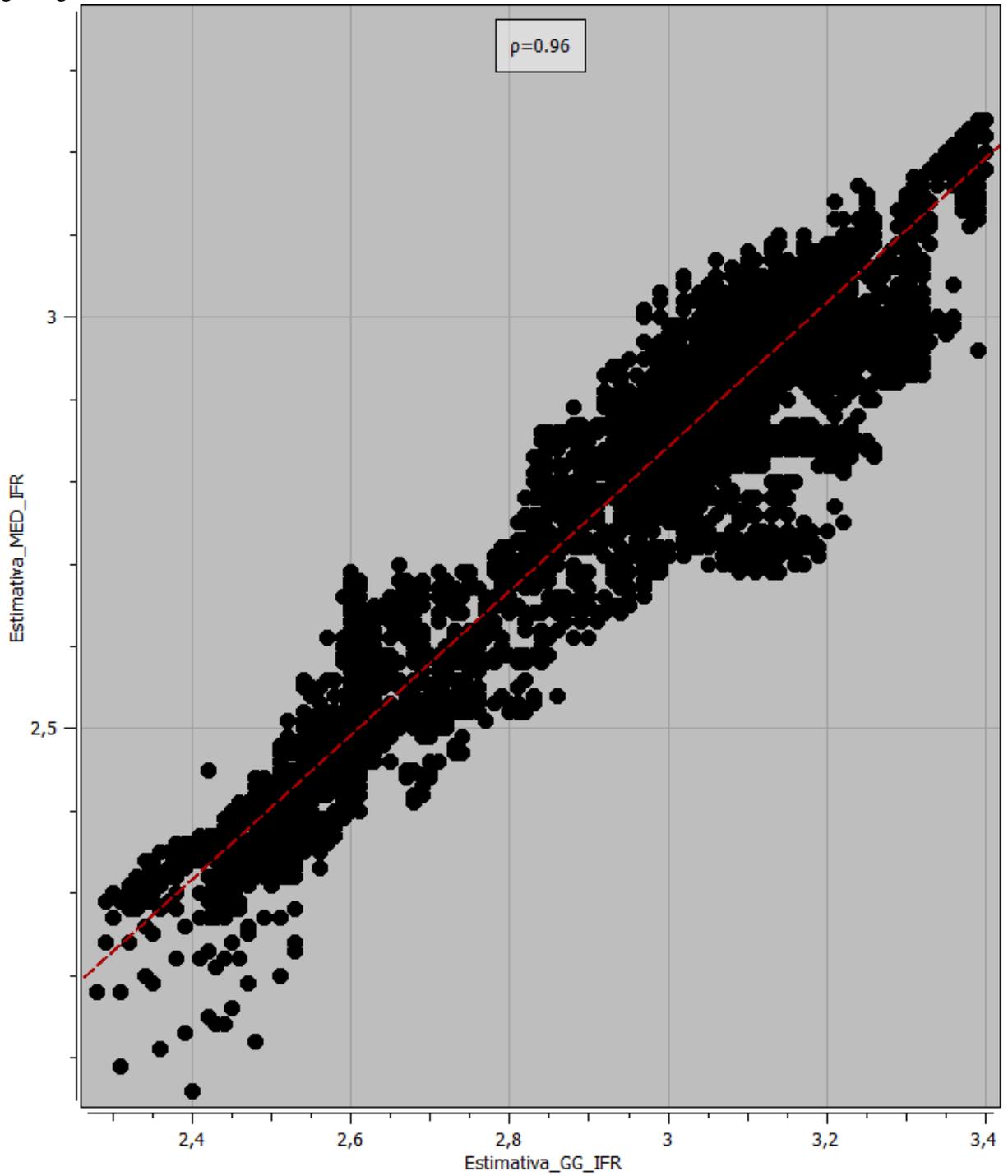
Fonte: elaborado pelo autor utilizando o software *Isatis.neo*.

Figura 132 - *Scatterplot* da massa calculada dos blocos selecionados do método da perfilagem geofísica gama-gama versus CNM.



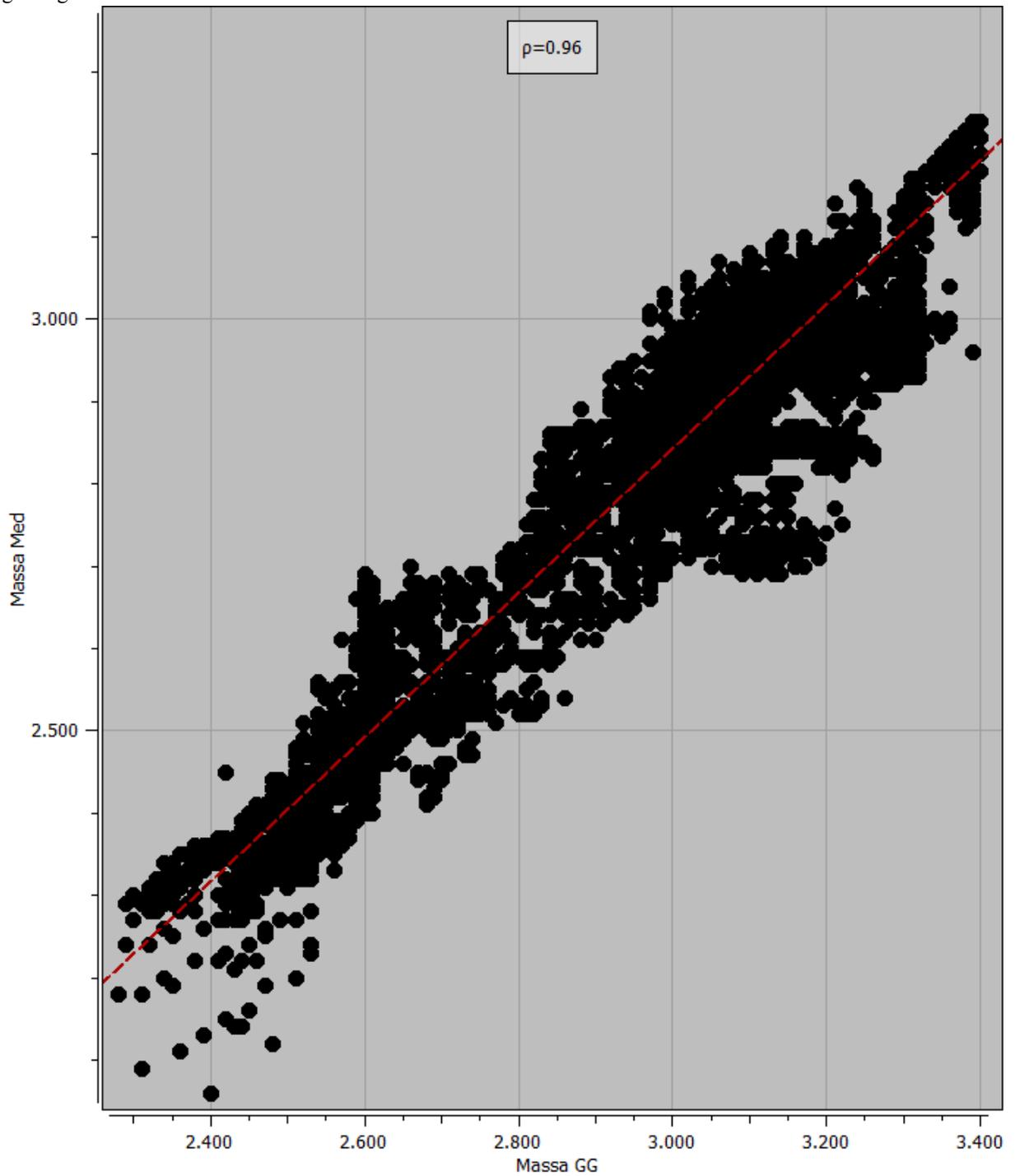
Fonte: elaborado pelo autor utilizando o *software Isatis.neo*.

Figura 133 - *Scatterplot* da densidade estimada dos blocos selecionados do método da perfilagem geofísica gama-gama versus ensaios diretos de laboratório.



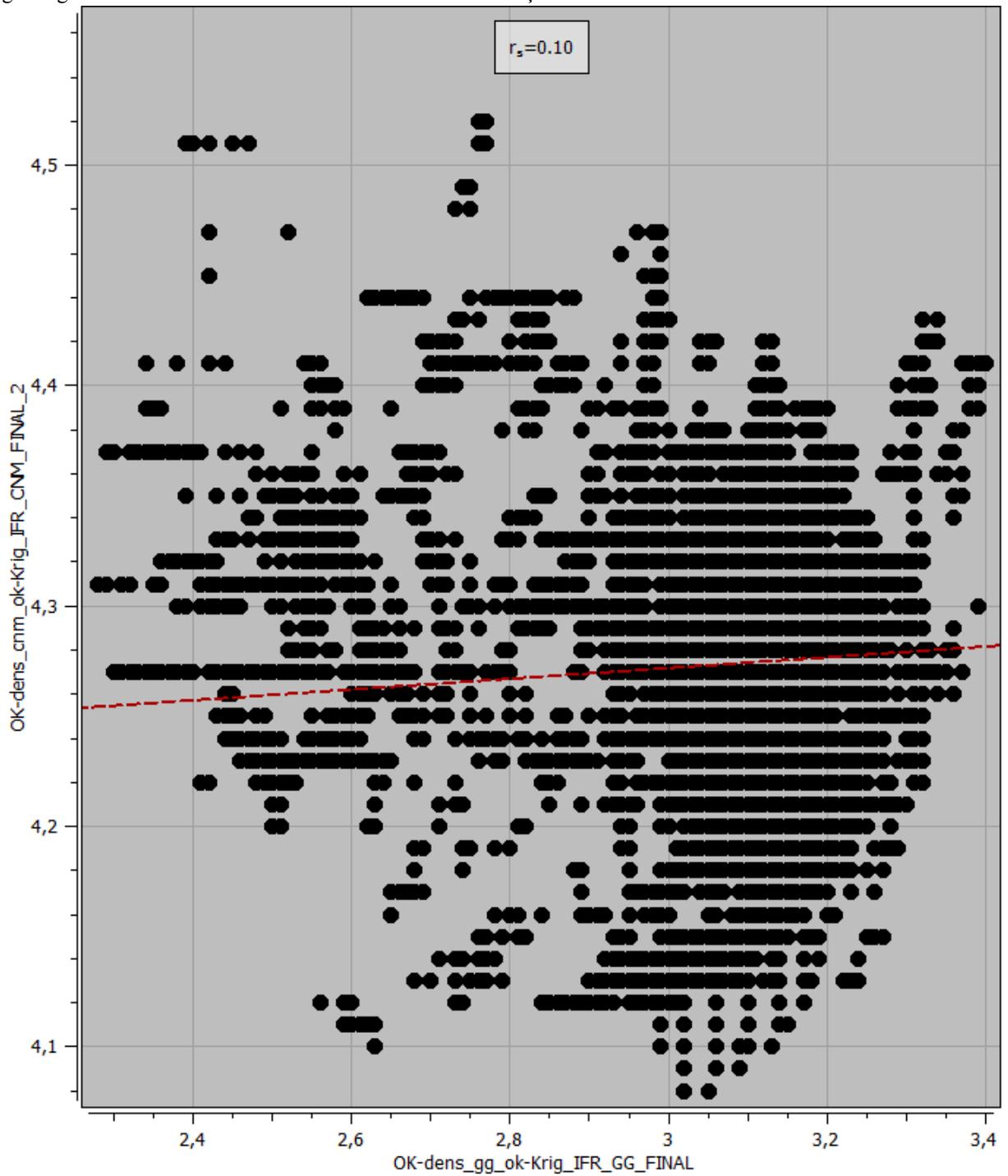
Fonte: elaborado pelo autor utilizando o *software Isatis.neo*.

Figura 134 - *Scatterplot* da massa calculada dos blocos selecionados do método da perfilagem geofísica gama-gama *versus* ensaios diretos de laboratório.



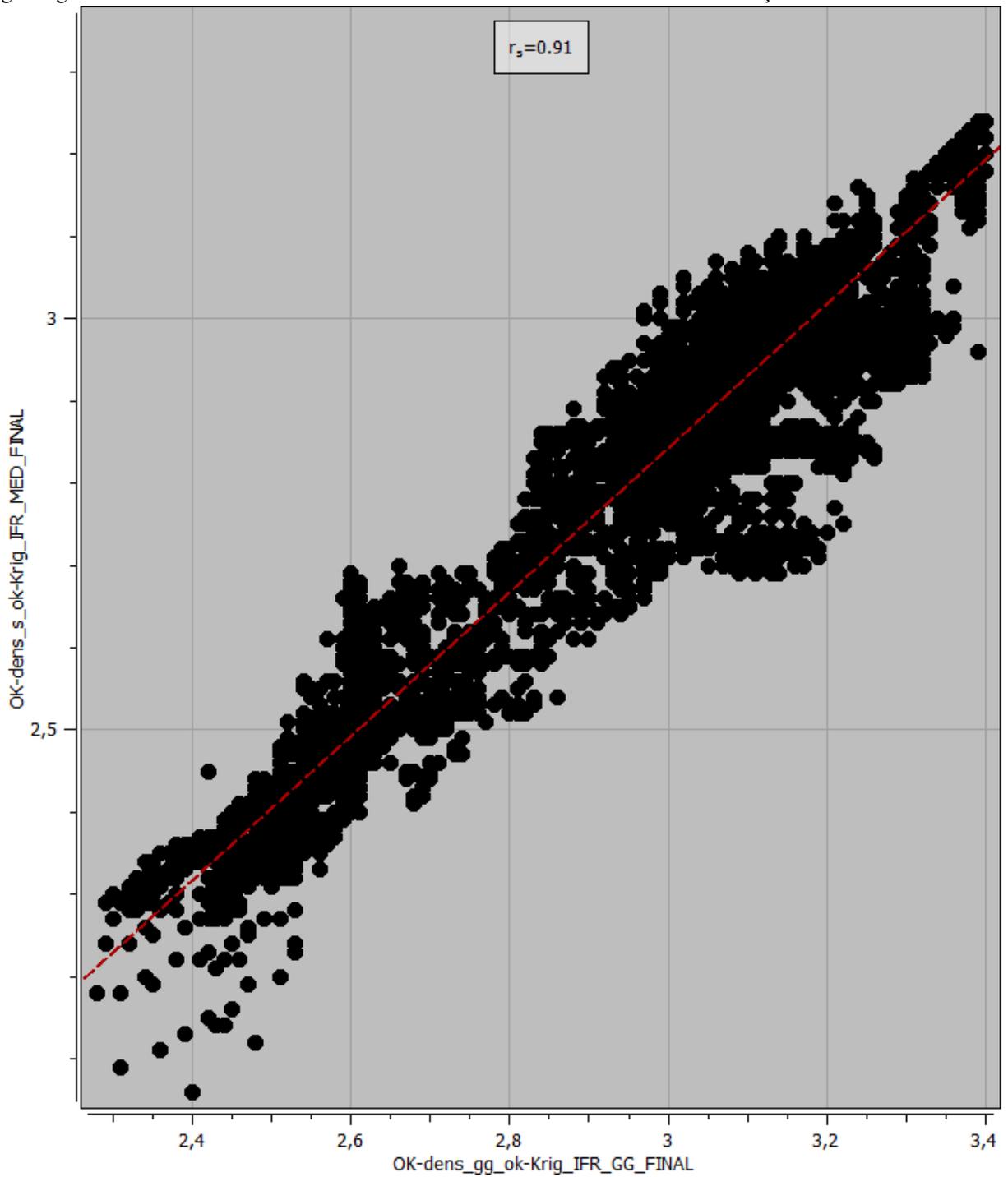
Fonte: elaborado pelo autor utilizando o *software Isatis.neo*.

Figura 135 - Scatterplot da densidade estimada dos blocos selecionados do método da perfilagem geofísica gama-gama versus CNM e utilizando coeficiente de correlação de rank.



Fonte: elaborado pelo autor utilizando o software *Isatis.neo*.

Figura 136 - *Scatterplot* da densidade estimada dos blocos selecionados do método da perfilagem geofísica gama-gama versus ensaios diretos de laboratório e considerando coeficiente de correlação de *rank*.



Fonte: elaborado pelo autor utilizando o *software Isatis.neo*.

Tabela 55 - Matriz de correlação da densidade dos blocos selecionados utilizando a perfilagem geofísica gama-gama como base.

	Gama-gama	Ensaios diretos	CNM
Gama-gama	1.00	0.96	0.10
Ensaios diretos	0.96	1.00	0.12
CNM	0.10	0.12	1.00

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 56 - Matriz de correlação da densidade dos blocos selecionados utilizando a perfilagem geofísica gama-gama como base para o coeficiente de *rank*.

	Gama-gama	Ensaios diretos	CNM
Gama-gama	1.00	0.91	0.10
Ensaios diretos	0.91	1.00	0.12
CNM	0.10	0.12	1.00

Fonte: elaborado pelo autor.

A diferença percentual entre o método da perfilagem geofísica gama-gama e o método dos ensaios diretos de laboratório foi de -5.14743% para a tonelagem. Isto quer dizer que para a estimativa dos ensaios diretos de laboratório o valor é cerca de 5.15% menor que a estimativa realizada para o método do gama-gama.

A diferença percentual entre a perfilagem geofísica gama-gama e o método CNM foi de 45.61313% para a tonelagem. Isso significa que a estimativa realizada para o CNM teve tanto a média quanto a massa cerca de 45.61% maior que para o método da perfilagem geofísica gama-gama.

Comparando a tonelagem para a densidade estimada pelo método da perfilagem gama-gama com a tonelagem obtida pelo valor de densidade apresentado no relatório da mina, a diferença percentual encontrada foi de -0.42179%. Esta baixa diferença percentual significa que as tonelagens calculadas utilizando os valores de densidade publicados no relatório e a partir da perfilagem geofísica gama-gama foram próximas, sendo a tonelagem utilizando o relatório como base para o cálculo apenas 0.42% menor. Isso é algo curioso, uma vez que para IC e IF a tonelagem utilizando o valor médio descrito no relatório da mina foram mais próximos para o método dos ensaios diretos de laboratório.

Para evidenciar isso foi calculada a diferença percentual entre a tonelagem referente aos ensaios diretos de laboratório e à densidade descrita no relatório. A diferença percentual foi de 4.96454%, ou seja, a tonelagem dos ensaios diretos é cerca de 4.96% menor que a tonelagem a partir da densidade média publicada no relatório.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo são feitas considerações finais acerca dos produtos obtidos através da estimativa por técnicas de krigagem ordinária, mas também dos estudos comparativos realizados posteriormente para analisar o impacto da utilização de diferentes bases de dados de densidade para compor as estimativas. Ainda neste capítulo também são apresentadas recomendações para trabalhos futuros acerca do tema que podem ser interessantes objetos de estudo.

A primeira litologia trabalhada foi o IC, onde inicialmente 961 amostras foram catalogadas como pertencentes a esta litologia. Entretanto os resultados da análises de densidade não contemplaram essas 961 amostras, sendo a perfilagem geofísica gama-gama o método com o maior número de dados de densidade para a litologia com 670 amostras. Ao produzir as estimativas foi observado que o modelo que possui o maior número de blocos estimados foi o método do CNM, mesmo sendo o método com menos amostras com valores de densidade no banco de dados. Provavelmente este grande número de blocos presentes no modelo de blocos está associado ao fato da direção de maior continuidade para o método do CNM na litologia IC ter tido um alcance de 750m, além de ter sido utilizado um raio de busca de 600m para as estimativas. Isso acabou gerando uma estimativa com mais de 800 mil blocos estimados para este método. Entretanto, o método do CNM não apresentou uma correlação com os métodos da perfilagem gama-gama ou dos ensaios diretos de laboratório.

A perfilagem geofísica gama-gama e o método dos ensaios diretos para a litologia IC apresentou um coeficiente de correlação linear de 0.60, que é o valor mínimo para ser considerado a existência de correlação entre duas variáveis, por mais que não seja uma correlação tão forte. A diferença percentual dos ensaios diretos de laboratório para o método do gama-gama foi cerca de -1.32%. Além do mais, a perfilagem geofísica gama-gama foi capaz de exibir uma maior variabilidade de densidade ao longo do depósito tanto ao longo da direção de maior continuidade, quanto em profundidade. No método dos ensaios diretos de laboratório e no método do CNM, o comportamento da variação da densidade parece mais homogêneo ao longo da direção E-W e menos explícito do ponto de vista da profundidade.

Após as estimativas para a litologia IC, foram realizadas as estimativas para a litologia IF. Esta litologia contava com 770 amostras classificadas como IF, mas novamente o método da perfilagem gama-gama foi aquele com o maior número de amostras, com 602 amostras.

Por mais que este método tenha tido o maior número de blocos selecionados para a comparação (mais de 240000 blocos em comum), as estimativas com maior número de blocos teve pouco mais de 311000 blocos estimados. Entretanto, estas estimativas se aproximaram da forma conhecida do corpo de minério, tanto nas direções N-S, quanto E-W, mas também na profundidade e espessura do corpo. O método do CNM, apesar de não apresentar correlação com os outros dois métodos, mostrou coeficiente de correlação linear de 0.32, maior que quando comparado com a litologia IC.

Para a litologia IF e levando em conta os métodos dos ensaios diretos de laboratório e a perfilagem geofísica gama-gama o coeficiente de correlação linear foi de 0.96, indicando que existe uma correlação linear forte entre as estimativas produzidas para os dois métodos. Apesar da alta correlação entre os valores estimados, a diferença percentual entre o método dos ensaios diretos e da perfilagem gama-gama foi de -4.44%, uma diferença maior que para a litologia IC em que a correlação entre os valores era menor, mas a diferença percentual foi mais baixa. A perfilagem geofísica gama-gama foi capaz de reproduzir o comportamento da variação da densidade ao longo da profundidade do depósito, evidenciado por zonas de mudança de coloração gradual à medida que a profundidade aumenta na porção central do bloco rochoso. Além do mais, tanto as estimativas para o gama-gama quanto dos ensaios diretos de laboratório concentraram as densidades maiores em uma porção centralizada mas de área pequena, envolta por regiões representadas por cores frias, que indicam um valor de densidade menor ao redor. A estimativa do CNM foi bem diferente, concentrando densidades mais altas nas porções centrais do corpo, representado pelas cores laranjas e vermelhas, sendo as cores frias mais raras de serem encontradas. Além do mais, a diferença percentual do CNM para o método do gama-gama foi de 37.28% a mais.

A litologia IFR conta com um número significativamente menor de amostras, sendo a contagem total 252 amostras, das quais apenas 91 tiveram o valor de densidade obtido através do CNM, 204 com valores obtidos pelos ensaios diretos de densidade e 209 amostras com valor de densidade obtido através do gama-gama. No que diz respeito às estimativas, para todos os métodos a estimativa contou com poucos blocos estimados, sendo o método dos ensaios diretos de laboratório aquele com maior número de blocos, pouco mais de 30000 blocos estimados. O método do CNM não apresentou correlação com os outros dois métodos, sendo o coeficiente de correlação linear igual a 0.10 e 0.12 para o gama-gama e os ensaios

diretos, respectivamente. Além disso, a diferença percentual entre o método do CNM e da perfilagem geofísica gama-gama é de 45.61%.

Já o método dos ensaios diretos de laboratório e perfilagem geofísica gama-gama exibiram uma correlação forte, evidenciada pelo coeficiente de correlação linear de valor 0.96. Entretanto a estimativa da densidade pelo método da perfilagem geofísica gama-gama, para a litologia IFR não foi a melhor possível, uma vez que o valor de densidade médio observado foi bem diferente da densidade média estimada, superestimando a densidade média do corpo rochoso. As estimativas dos métodos do gama-gama e ensaios diretos representaram o fenômeno da variação de densidade de maneiras parecidas. Isso fica evidente ao observar as regiões produzidas pelas duas estimativas, que concentrou cores quentes no centro da imagem, mas com uma porção a leste com cores predominantemente frias. Quanto à variação ao longo da profundidade, tanto o gama-gama quanto os ensaios diretos foram capazes de reproduzir a variação vertical da mesma ao longo do corpo. A diferença percentual entre o método dos ensaios diretos e da perfilagem geofísica gama-gama é cerca de -5.15%, logo as estimativas dos métodos dos ensaios diretos são cerca de 5% menores em valor de densidade e massa do que a estimativa envolvendo o método do gama-gama.

Dentre as estimativas produzidas, as que envolvem a litologia IF foram as mais promissoras, uma vez que seu produto se assemelhou à forma do corpo de minério, além da grande quantidade de blocos em comum. A estimativa da litologia IFR contou com poucos blocos estimados, provavelmente o número menor de amostras disponíveis para fazer as análises pode ter impactado a investigação durante a etapa da variografia, que acabam por influenciar as etapas seguintes no processo da estimativa.

No que diz respeito às estimativas para a litologia IC, estas foram capazes de reproduzir a forma do corpo de minério, sendo alongada na direção E-W, entretanto o número de blocos selecionados em comum foi baixo. Este número menor de blocos em comum pode ser o motivo da diferença de comportamento gritante entre IC e IF, principalmente nos valores de correlação entre as variáveis.

Para a litologia IC, quando comparados os sumários das estimativas com a densidade descrita no relatório da mina, foi observado uma diferença significativa nos valores da média, no valor mínimo e no valor máximo. Entretanto, quando comparados com os blocos

selecionados em comum, os valores se aproximavam para os métodos da perfilagem geofísica e para os ensaios diretos, sendo o segundo mais próximos que o primeiro.

Para a litologia IF, o método da perfilagem gama-gama não se aproximou tanto dos valores de densidade presentes no relatório da mina, mas o método dos ensaios diretos de laboratório novamente apresentou um comportamento parecido.

No que diz respeito à litologia IFR, os dados relacionados ao método dos ensaios diretos não tiveram comportamento tão similar, mas aqueles relativos à perfilagem geofísica gama-gama exibiram uma certa similaridade, tanto na estimativa como um todo, tanto quanto nos blocos selecionados. Tal comportamento foi tamanho, que para esta litologia o método do gama-gama foi quem exibiu menor diferença percentual, quando comparado à tonelagem calculada a partir da densidade média do relatório da mina. Para as outras duas litologias, quem mostrou menor diferença percentual em relação à tonelagem calculada a partir da densidade média do relatório foi o método dos ensaios diretos de laboratório.

Quando comparados os métodos do gama-gama e dos ensaios diretos, foi comprovada a existência de correlação linear entre os mesmos, sendo em duas ocasiões uma forte correlação (com o coeficiente valendo 0.96) e na outra uma correlação existente (com o coeficiente de valor 0.60). Tal comportamento indica que o método da perfilagem geofísica gama-gama pode ser utilizado como uma ferramenta auxiliar para complementar informações dos ensaios diretos de laboratório, bem como de utilizar do conhecimento de regressão linear para poder inferir valores de densidade para o método dos ensaios diretos a partir dos dados de densidade da perfilagem gama-gama. Outro fator importante do método da perfilagem geofísica é a capacidade de observar e reproduzir a variabilidade ao longo da profundidade do depósito, que as estimativas dos outros métodos detectam, mas não com tanta precisão.

Ainda sobre os métodos, é interessante pontuar que, todas as estimativas referentes ao método do CNM destoam bastante das demais, bem como dos valores publicados no relatório da mina, superestimando os valores. Na verdade não somente nas estimativas, mas os dados presentes no banco de dados relativos a este método tem valor de média, máximo e mínimo bem diferentes dos outros dois métodos e do relatório da mina, sendo esta diferença positiva, isto é, são valores mais altos quando comparados com os outros. Isso fica muito evidente quando se leva em conta o valor da massa calculado, mas também olhando para as

estimativas, uma vez que todas as estimativas referentes ao método do CNM apresentam cores quentes, indicando que os valores de densidade estão mais altos, quando comparados aos outros dois métodos.

Por mais que os resultados das estimativas para as litologias IC e IFR não foram os esperados, é difícil afirmar qual o motivo que levou a estas estimativas a exibirem estes resultados. Provavelmente as estimativas ligadas ao IFR foram condicionadas pelo baixo número de amostras disponíveis para análise nas etapas que antecedem as estimativas. Quanto ao IC, o que mais chamou a atenção foi o baixo número de blocos selecionados para comparação, que além de serem poucos blocos em comum, se concentraram em uma região particular do depósito, situado mais a oeste do mesmo.

Com o desenvolvimento do seguinte trabalho foi possível aplicar conceitos de diversas áreas de atuação do conhecimento, com o intuito de comparar diferentes bases de dados de densidade e seu impacto no cálculo da tonelagem de um depósito mineral. Entretanto, ao longo do trabalho foram surgindo algumas dúvidas, sendo algumas delas relacionadas ao banco de dados, o que evidenciou o nível de dificuldade de realizar um trabalho com dados coletados e manipulados por outras pessoas. Com certeza seria melhor poder realizar algumas etapas como a coleta de amostras, análise de amostras, tratamento do banco de dados entre outros, porém isso impediria a realização deste trabalho.

Levando em conta esta dificuldade explicitada, bem como os resultados obtidos, fica a sugestão para trabalhos futuros a investigação da existência de alguma relação entre o litotipo e/ou composição mineralógica e qualidade da estimativa. Para poder verificar a existência ou não desta relação seriam realizadas estimativas de densidade para todas as litologias presentes no depósito e para cada método diferente de obtenção de densidade, para que os valores estimados fossem comparados com aqueles observados através das diferentes técnicas de amostragem. Tal trabalho, se realizado da maneira adequada, seria capaz de verificar se diferentes tipos de rochas ou minerais afetam a qualidade da estimativa, ou ainda, se existe algum mineral ou rocha que têm maiores erros associados à estimativa que outros.

Outra sugestão para trabalhos futuros seria procurar depósitos diferentes (depósitos regulares, depósitos erráticos, depósitos disseminados), cuja densidade tenha sido obtida por pelo menos mais dois dos métodos apresentados e discutidos no trabalho, com o intuito de

realizar comparações. Então, a partir destas comparações e com uma análise detalhada dos resultados, seria possível além de investigar a relação entre os diferentes métodos de obter a densidade e litologia/mineralogia, como estes diferentes métodos se comportam em diferentes depósitos, se afeta a qualidade da estimativa ou se gera algum viés na mesma.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABZALOV, Marat. **Measuring and modelling of dry bulk rock density for mineral resources estimation**. 2013. Applied Earth Science (Trans. Inst. Min. Metall. B), vol 122, 15p.

ABZALOV, Marat. **Applied Mining Geology**. 2016. Springer International Publishing AG Switzerland. 443 p.

ALBUQUERQUE, Heitor Pereira. **Estimativa e classificação de recurso mineral para um depósito de ferro**. 2021. 91 p. Trabalho de conclusão de curso para obtenção do grau Bacharel em Engenharia de Minas. Centro Federal de Educação Tecnológica Minas Gerais - Unidade Araxá.

ARSENEAU, Gilles. J. **Estimation of bulk density for mineral resource reporting**. 2013. Published by SRK news Mineral Resource Estimation in SRK Consulting's International Newsletter No. 51. 2015.

BRAGA, Deivid de Moura. **Técnicas de análise de densidade e porosidade de minério de ferro por cálculo normativo mineralógico, microtomografia computadorizada, permoporosimetria e picnometria clássica: um estudo comparativo entre os métodos**. 2019. 283 p. Dissertação de mestrado para obtenção do título de mestre em engenharia. Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

CASTRO, Paulo de Tarso Amorim; ENDO, Issamu; GANDINI, Antonio Luciano. **Quadrilátero Ferrífero: Avanço do conhecimento nos últimos 50 anos**. Editora 3i, Belo Horizonte - MG. 482 p., 2020.

CASTRO, Paulo de Tarso Amorim; JÚNIOR, Hermínio Arias Nalini; DE LIMA, Hernani Mota. **Entendendo a mineração no Quadrilátero Ferrífero**. 2011. Universidade Federal de Ouro Preto, Centro de Estudos Avançados Quadrilátero Ferrífero, Belo Horizonte.

CRAWFORD, Kacy Mackenzey. **Determination of bulk density of rock core using standard industry methods**. 2013. 217 p. Michigan Technological University, Michigan.

DA SILVA, Camilla Zacché. **Uso da perfilagem geofísica gama-gama e gama natural na mineração: suas aplicações, vantagens e limitações.** 2010. 35 p. Trabalho de Conclusão de curso (Graduação em Física) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

DARLING, Peter. **SME MINING ENGINEERING HANDBOOK THIRD EDITION.** Published by Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc. USA. 1912 p., 2011.

DAVIS, John C. **Statistics and Data Analysis in Geology, Third Edition.** Kansas Geological Survey, The University of Kansas. Published by John Wiley & Sons, USA. 677 p., 2002.

DE ALMEIDA, Tiago. **A perfilagem geofísica gama-gama em depósitos de ferro do Quadrilátero Ferrífero - uma ferramenta para medições de densidade de rochas.** 2011. 181 p. Dissertação de mestrado para obtenção do título de mestre em engenharia. Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

GONÇALVES, Gizele Maria Campos. **Caracterização tecnológica do itabirito anfíbolito da Mina de Brucutu - MG.** 2020. Dissertação de mestrado para obtenção do título de mestre em engenharia mineral. Escola de Engenharia da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

ISAAKS, Edward H.; SRIVASTAVA, Mohan R. 1989. **Applied geostatistics.** Oxford University Press, New York.

LISBOA, Mayara da Costa. **Impacto da incorporação da variável densidade na estimativa de reservas minerais de ferro: mina de Brucutu.** 2018. 126 p. Dissertação de mestrado para obtenção do título de mestre em engenharia. Escola de Engenharia da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

LOMBERG, K.G. **Density: Bulk in-situ or SG?.** 2021. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, vol. 121, no. 9, pp. 469–474.

MAKHUVHA, M.; ARELLANO, R. M.; HARNEY, D. M. W. **Determination of bulk density, methods and impacts, with a case study from Los Bronces Mine, Chile.** 2014. Applied Earth Science, 123:3, 196-205.

MATHERON, Georges. **Principles of Geostatistics**. Economic Geology. Vol 58, 1963, p. 1246-1266. Paris, França.

MELFI, Adolpho José; MISI, Aroldo; CAMPOS, Diógenes de Almeida; CORDANI, Umberto Giuseppe. **Recursos minerais no Brasil problemas e desafios**. 2016. Academia Brasileira de Ciências e Vale S.A., Rio de Janeiro, Brasil. 423 p.

MOTTA, Eduardo. G. M.. **Definição de Domínios Mineralógicos em Minério de Ferro utilizando krigagem de indicadores**. 2014. Dissertação Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais (PPG3EM), Porto Alegre, 220p.

MOTTA, Eduardo; MORAES, Israel; APOLÔNIO, Pedro; RIBEIRO, Diniz; FILHO, Evandro M. Cunha. **Incorporating mineralogical and density parameters in ferrous resource evaluation using mineralogical norm calculation - MNC**. 2016. 24th World Mining Congress, Rio de Janeiro, Brasil. p. 209-221.

REIS, Celso; ARROYO, Carlos; CURI, Adilson; ZANGRANDI, Marcelo. **Impact of bulk density estimation in mine planning**. 2021. Mining Technology, 130:1, 60-65.

REIS, Celso Henrique Miranda. **Estimativa da variável densidade e seu impacto no planejamento de lavra: estudo de caso mina de Serra Azul**. 2019. 86 p. Dissertação de mestrado para obtenção do título de mestre em engenharia. Escola de Engenharia da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

ROSSI, Mario E.; DEUTSCH, Clayton V. **Mineral Resource Estimation**. Springer, Dordrecht, 2014.

RUCHKYS, Úrsula Azevedo; MACHADO, Maria Márcia Magela. **Patrimônio geológico e mineiro do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais - Caracterização e iniciativas de uso para educação e geoturismo**. 2013. Boletim paranaense de geociências, volume 70, p. 120-136.

SANTOS, P. A.. **Estudo de densidade de rocha e comparação de técnicas de medição, na região do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil**. 2006. ISEI, ITABIRA, 58 p.

SINCLAIR, Alastair J.; BLACKWELL, Garston H. **Applied mineral inventory estimation**. Cambridge University Press, 2004.

VALE. **Relatório de Recursos Minerais - Mina de Alegria, Base Outubro de 2015**. Abril 2017. 247p. Diretoria de Planejamento e Desenvolvimento de Ferrosos, Gerência Executiva de Geologia e Planejamento de Mina, Gerência de Recursos Minerais Ferrosos. Vale S.A., Brasil.

WEBBER, Tiago. **Estimativa de qualidade de carvão usando krigagem dos indicadores aplicados a dados obtidos por perfilagem geofísica**. 2008. 268 p. Dissertação de mestrado para obtenção do título de mestre em engenharia. Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

YAMAMOTO, Jorge Kazuo. **Avaliação e Classificação de Reservas Minerais**. Editora da Universidade de São Paulo - EDUSP. 2001.

YAMAMOTO, Jorge Kazuo. **An Alternative Measure of the Reliability of Ordinary Kriging Estimates**. 2000. *Mathematical Geology*, Vol. 32, No. 4. International Association of Mathematical Geology.

8. ANEXOS

Nesta seção do trabalho serão apresentadas as Tabelas referentes aos testes conduzidos para verificar os melhores parâmetros para utilizar na estimativa. Os parâmetros adotados como os melhores não necessariamente são aqueles com a menor média do erro residual, mas aqueles com baixo erro residual, com um coeficiente de correlação linear bom e alto número de dados associados à estimativa. U, V e W representam os raios nas direções de maior continuidade, menor continuidade e vertical; em seguida temos o número máximo de amostras para a interpolação e o número mínimo de amostras para a interpolação; em seguida temos a média do erro residual, o coeficiente de correlação linear (p) e os dados robustos e os dados definidos na interpolação. É importante ressaltar que em todos os testes o número de setores angulares foi definido como 1 (que seria o mesmo que não usar setores angulares) e que o número máximo de amostras por setor é o mesmo que o máximo de amostras na interpolação.

IC - CNM

U	V	W	Máx. amostras	Mín. amostras	Méd. erro	Coef. p	Dados robustos	Dados def.
750	245	105	16	2	-0.01	0.83	550	581
600	195	85	16	2	-0.01	0.83	549	579
525	170	75	16	2	-0.01	0.82	546	576
450	145	65	16	2	-0.01	0.82	546	576
375	125	55	16	2	-0.01	0.82	542	571
300	100	45	16	2	-0.01	0.83	535	565
190	60	25	16	2	-0.02	0.83	499	528
600	195	85	16	3	-0.01	0.83	548	578
600	195	85	16	4	-0.01	0.83	546	576

IC - Gama-gama

U	V	W	Máx. amostras	Mín. amostras	Méd. erro	Coef. p	Dados robustos	Dados def.
330	130	100	16	2	0.00	0.73	646	654
300	115	90	16	2	0.00	0.73	643	651
265	105	80	16	2	0.00	0.73	639	647
245	95	75	16	2	0.00	0.74	635	643
200	80	60	16	2	0.00	0.74	616	625
165	65	50	16	2	0.00	0.74	598	607
130	50	40	16	2	0.01	0.74	579	588
100	40	30	16	2	0.01	0.75	558	566
80	30	25	16	2	-0.00	0.77	539	545
200	80	60	16	3	0.00	0.75	595	604
200	80	60	16	4	0.01	0.75	571	579

IC - Ensaios diretos

U	V	W	Máx. amostras	Mín. amostras	Méd. erro	Coef. p	Dados robustos	Dados def.
360	95	90	16	2	0.01	0.76	604	614
290	75	70	16	2	0.01	0.76	596	606
180	50	45	16	2	0.00	0.78	558	568
145	40	35	16	2	0.01	0.78	549	559
90	25	20	16	2	-0.00	0.80	480	489
180	50	45	16	3	0.01	0.78	535	545
180	50	45	16	4	-0.01	0.79	496	505

IF - CNM

U	V	W	Máx. amostras	Mín. amostras	Méd. erro	Coef. p	Dados robustos	Dados def.
265	210	170	16	2	0.00	0.83	426	434
210	170	135	16	2	-0.00	0.83	418	426
135	105	85	16	2	0.00	0.83	411	419
105	85	70	16	2	-0.00	0.83	399	408
265	210	170	16	3	-0.00	0.83	421	429
265	210	170	16	4	-0.00	0.84	415	423

IF - Gama-gama

U	V	W	Máx. amostras	Mín. amostras	Méd. erro	Coef. p	Dados robustos	Dados def.
755	385	145	16	2	-0.01	0.77	591	602
605	305	115	16	2	-0.01	0.78	590	601
530	270	100	16	2	-0.00	0.78	588	599
455	230	85	16	2	-0.00	0.78	582	593
380	195	75	16	2	0.00	0.78	581	592
300	155	60	16	2	0.00	0.77	572	583
190	95	35	16	2	0.01	0.79	528	537
380	195	75	16	3	0.00	0.78	577	588
380	195	75	16	4	0.01	0.79	567	577

IF - Ensaios diretos

U	V	W	Máx. amostras	Mín. amostras	Méd. erro	Coef. <i>p</i>	Dados robustos	Dados def.
750	500	140	16	2	-0.01	0.77	568	578
600	400	110	16	2	-0.01	0.77	568	577
375	250	70	16	2	-0.00	0.77	560	569
300	200	55	16	2	0.00	0.77	552	561
375	250	70	16	3	-0.01	0.77	557	566
375	250	70	16	4	0.01	0.78	546	555

IFR - CNM

U	V	W	Máx. amostras	Mín. amostras	Méd. erro	Coef. p	Dados robustos	Dados def.
575	250	85	16	2	-0.02	0.38	79	87
460	200	70	16	2	-0.01	0.37	75	83
280	125	45	16	2	0.02	0.43	60	69
230	100	35	16	2	0.01	0.43	60	69
145	65	20	16	2	0.05	0.35	49	58
460	200	70	16	3	-0.05	0.27	67	75
460	200	70	16	4	0.01	0.29	60	68

IFR - Gama-gama

U	V	W	Máx. amostras	Mín. amostras	Méd. erro	Coef. p	Dados robustos	Dados def.
850	420	110	16	2	-0.01	0.75	192	207
680	335	90	16	2	-0.02	0.74	192	206
425	210	55	16	2	-0.01	0.75	185	199
340	170	45	16	2	-0.01	0.76	180	191
210	105	30	16	2	-0.05	0.78	150	157
340	170	45	16	3	-0.01	0.75	166	177
340	170	45	16	4	-0.00	0.78	145	152

IFR - Ensaios diretos

U	V	W	Máx. amostras	Mín. amostras	Méd. erro	Coef. p	Dados robustos	Dados def.
950	550	175	16	2	0.01	0.71	194	204
760	440	140	16	2	0.02	0.71	193	203
475	275	90	16	2	0.01	0.72	188	198
380	220	70	16	2	0.02	0.72	183	193
240	140	45	16	2	0.03	0.73	159	167
475	275	90	16	3	0.01	0.72	186	196
475	275	90	16	4	0.02	0.74	184	193