

à modelagem.

Figura 4.8 – Parâmetros para a determinação das coordenadas dos pontos estimados no *addcoord*.

```
Parameters for ADDCOORD
*****

START OF PARAMETERS:
[1]IK3DMODA.out      -file with data
[2]IK3DCRD.out      -file for output
[3]1                 -realization number
[4]310  618629.0     10.0    -nx,xmn,xsiz
[5]202  8104598.0    10.0    -ny,ymn,ysiz
[6]38   550.0        5.0     -nz,zmn,zsiz
```

Fonte: O autor (2017)

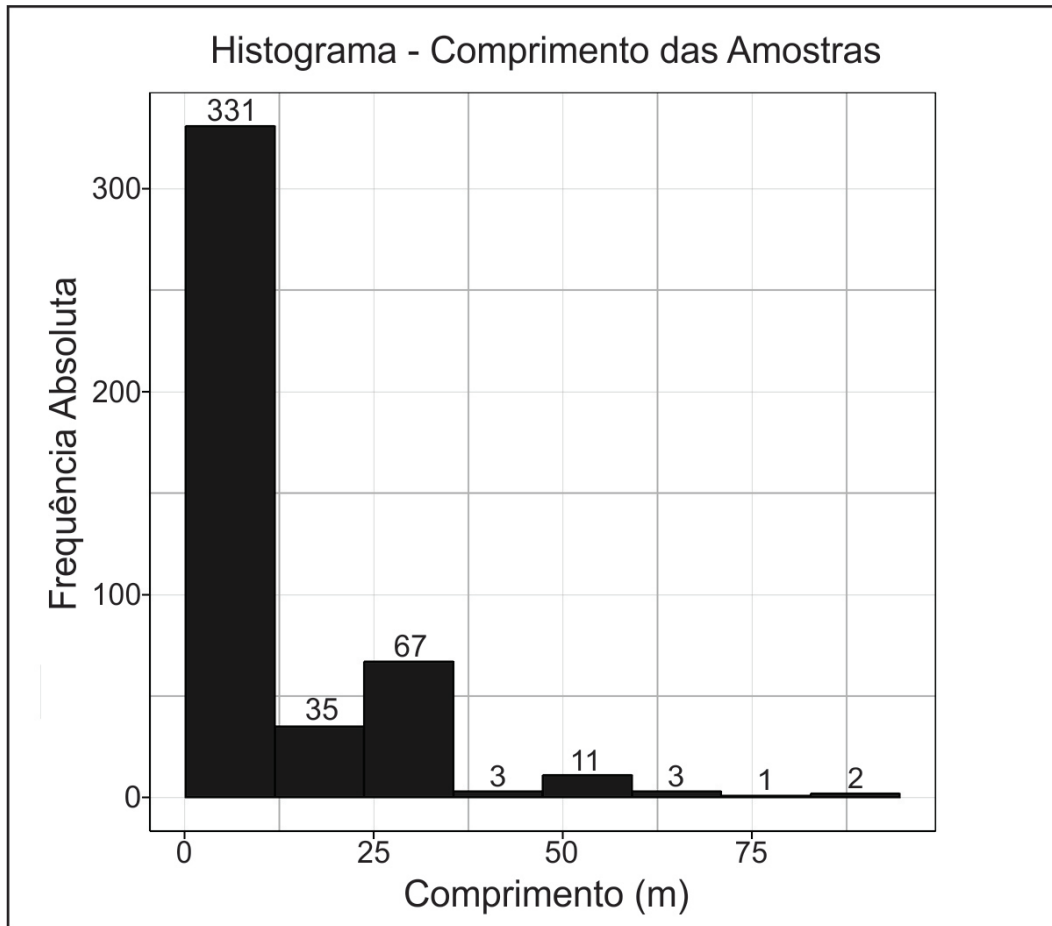
4.5 Elaboração do Inventário Mineral de Teores

O modelo geológico, ou seja, a representação da disposição espacial dos domínios litológicos presentes, é a base sobre a qual são realizadas as estimativas das variáveis que controlam a mineralização, neste caso as variáveis CaO e MgO. O modelo resultante do processo de estimativa de teores é denominado “inventário mineral” ou “modelo geológico de teores”, o qual contém, além das informações referentes à localização espacial de cada domínio litológico, as estimativas das variáveis químicas - neste caso óxidos - nos locais não amostrados.

As estimativas dos óxidos CaO e MgO foram realizadas por meio de Krigagem Ordinária (KO), uma vez que é um procedimento que enfatiza as variações locais de teores (média local), além de ser mais precisa em relação à Krigagem Simples (KS) quando não se tem uma grande disponibilidade de informações amostrais.

O procedimento para a realização das estimativas dos óxidos, teve início com uma etapa de regularização (compositagem) do tamanho, ou suporte, das amostras, já que a análise deste parâmetro evidenciou variações expressivas nos seus valores (Figura 4.9). Portanto, observando o comportamento do suporte amostral, e visando a menor perda possível de informações analíticas, o suporte foi padronizado para o tamanho de 1 (um) metro. Tal procedimento foi realizado com o propósito de evitar acentuação de erros de estimativa, já que os procedimentos de estimação consideram o suporte dos dados constante.

Figura 4.9 – Histograma do comprimento das amostras.



Fonte: O autor (2017)

A partir dos dados com suporte regularizado, procedeu-se com o cálculo dos variogramas experimentais para os dois óxidos, seguido dos respectivos ajustes variográficos. Considerando que os domínios estimados seriam apenas os calcários (CLC, MAG e DOL), foi realizado os cálculos dos variogramas experimentais somente a partir das amostras de tais unidades litológicas. As amostras dos demais domínios (CLI e VMV) foram retiradas dos cálculos pelo fato de que tais categorias estão relacionadas a uma gênese distinta da dos calcários, em especial a categoria VMV. Além disso, as unidades CLI e VMV constituem material estéril, ou seja, não são aproveitáveis economicamente.

As amostras das unidades litológicas CLC, MAG e DOL foram, como exposto previamente, a base para o cálculo dos variogramas experimentais e o subsequente ajuste teórico. Da mesma forma que para as variáveis indicadores, foram calculados três variogramas experimentais; dois no plano horizontal, perpendiculares entre si, e um na vertical, ou seja, com inclinação (*dip*) igual a 90°.

Analisando o comportamento do alcance em várias direções, observou-se, tanto para a variável CaO quanto para a MgO, a ocorrência dos maiores valores na direção NE, em par-

ticalar próximo ao azimute de 50°, e dos menores valores na direção SE, próximo do azimute de 140°. Portanto, a partir de tal análise, os variogramas experimentais da variável CaO foram calculados, no plano horizontal, nos azimutes de 52° e 142°, e da variável MgO, nos azimutes 50° e 140°, também no plano horizontal. Em seguida, os variogramas experimentais de cada variável foram ajustados interativamente por modelos teóricos, considerando-se, no ato do ajuste, os parâmetros (Efeito Pepita, modelos teóricos e número de estruturas) mais adequados aos três variogramas simultaneamente.

Na sequência, a partir das informações obtidas com o ajuste variográfico dos óxidos CaO e MgO, foi realizada a estimativa destes no Datamine Studio 3[®] por meio do processo “estimate”. Os domínios geológicos submetidos ao processo de estimativa foram apenas as unidades dos calcários calcítico, magnesiano e dolomítico. As demais unidades não foram consideradas por dois motivos: (i) insuficiência de amostras para análise estrutural (construção de variogramas), e (ii) constituem material estéril, ou seja, não aproveitável economicamente, não gerando, portanto, valor econômico, apenas custos.

A estimativa dos óxidos, ao contrário dos variogramas, não foi realizada a partir das amostras das unidades CLC, MAG e DOL em conjunto, mas separadamente. Assim, extraiu-se os blocos de cada uma, e utilizando-se somente as amostras da respectiva unidade, fez-se com a estimativa. Portanto, a unidade CLC foi estimada somente nos blocos desta, a partir somente as amostras atribuídas a esta unidade, e sucessivamente para as demais unidades litológicas.

No processo de estimativa, para os dois óxidos, a classificação dos recursos minerais foi feita a partir do volume (elipsoide) de busca empregado. Desta forma, foram elaborados três elipsoides de busca: um com os eixos correspondentes a 2/3 (dois terços) dos respectivos alcances variográficos, atribuído ao Recurso Medido; outro com eixos correspondentes aos respectivos alcances totais, atribuído ao Recurso Indicado; e o outro com eixos maiores que os respectivos alcances variográficos, atribuído ao Recurso Inferido. A Tabela 4.7 exibe os comprimentos dos eixos dos três elipsoides de busca, para cada óxido estimado.

Tabela 4.7 – Comprimento e orientação dos eixos dos elipsoides dos recursos Medido, Indicado e Inferido para os óxidos CaO e MgO

Variável	Orientação	Comprimentos (m)		
		Recurso Medido	Recurso Indicado	Recurso Inferido
CaO	Horizontal 52°	187,00	280,00	561,00
	Horizontal 142°	113,00	170,00	339,00
	Vertical	35,00	53,00	105,00
MgO	Horizontal 50°	219,00	328,00	656,00
	Horizontal 140°	105,00	157,00	315,00
	Vertical	36,00	54,00	108,00

Fonte: O autor (2017)

No interior de cada volume de busca, para cada óxido, foram definidos os parâmetros da busca, tais como números mínimo e máximo de amostras, número máximo de amostras por cada furo de sondagem, opção de busca por octante, dentre outros. Tais parâmetros definem o andamento do processo de estimativa, de tal forma que fornecem opções de se obter teores estimados, a partir de uma estimativa mais local ou não (número máximo de amostras), com restrições maiores ou menores quanto à classificação dos recursos minerais (número mínimo por volume de busca), e com desagrupamento ou não no próprio processo de estimação (busca por octante). Quanto a este último critério não foi utilizada busca por octantes devido à inexistência de agrupamentos preferenciais de amostras. Os critérios de busca utilizados nas estimativas dos dois óxidos estão expostos na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Parâmetros de busca utilizados para as estimativas para as variáveis CaO e MgO nos domínios CLC, MAG e DOL.

Categoria de Recurso	Min. de Amostras	Máx. de Amostras	Máx. por Furo
Medido	6	12	3
Indicado	4	11	
Inferido	3	8	

Fonte: O autor (2017)

Após a conclusão das estimativas, os modelos, estimados isoladamente, foram unidos por meio do processo “addmod” no Datamine Studio 3[®], gerando então, o inventário mineral de teores. Tal procedimento foi aplicado tanto para o óxido CaO quanto para o MgO. O modelo resultante (inventário mineral), contendo os valores previstos dos óxidos, foi a base para a elaboração do modelo econômico e a subsequente formulação da cava matemática ótima.

4.6 Modelo Econômico e Otimização de Cava

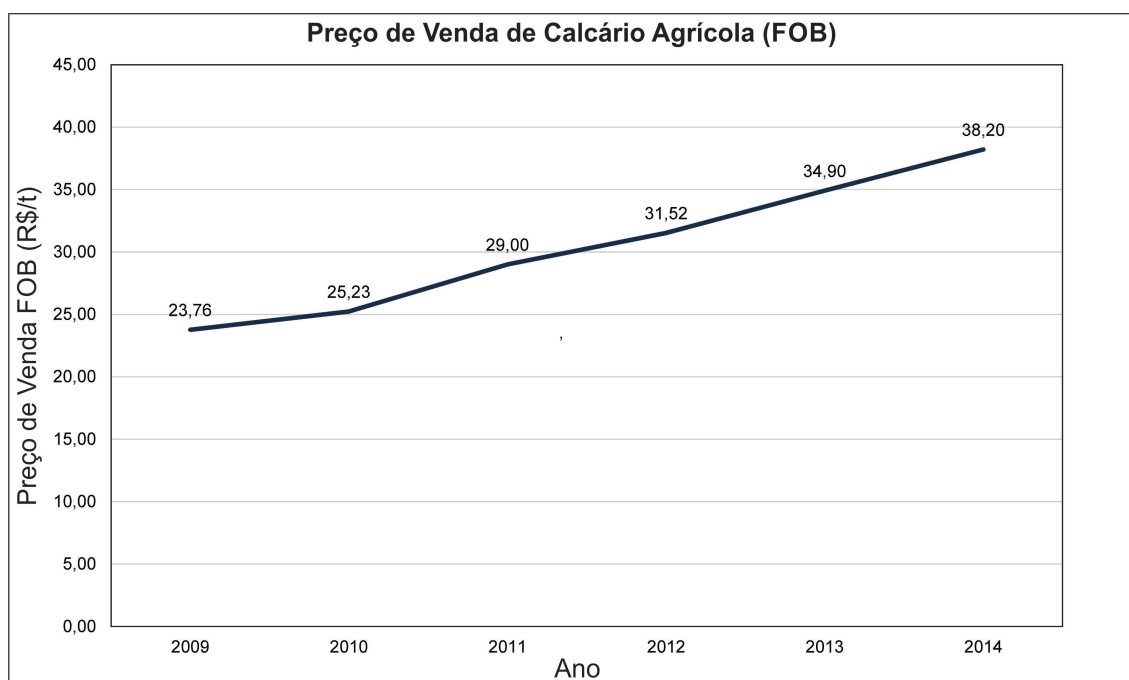
O modelo econômico de blocos foi estabelecido a partir das seguintes informações: (i) preço de venda dos produtos; (ii) regime de trabalho (horas trabalhadas); (iii) produção, (iv) equipamentos de lavra e de processamento, e; (v) custos operacionais. Para tal foram utilizados como fonte de informações e referências técnicas relatórios disponibilizados pelo Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) (DNPM, 2011; DNPM, 2012; DNPM, 2013; DNPM, 2014; DNPM, 2015) e um Plano de Aproveitamento Econômico (PAE) de calcário agrícola submetido ao DNPM em 2009 (BESSA JÚNIOR, 2009).

Primeiramente, para todos os fins, foi determinado que os produtos a serem eventualmente comercializados seriam para fins agrícolas, ou seja, calcário calcítico agrícola (MgO \leq 5% e PN \geq 80) e calcário dolomítico agrícola (MgO $>$ 5% e PN \geq 80). Portanto, as pesquisas de mercado no que tange a preços de venda foram direcionadas a estes produtos. Além

disso, o preço de venda considerado foi relativo ao valor antes da aplicação de impostos e encargos, ou seja, *Free on Board* (FOB).

A estimativa dos preços de venda foi realizada a partir de históricos disponibilizados pelo DNPM nos Sumários Mineraiis, de publicação anual (DNPM, 2011; DNPM, 2012; DNPM, 2013; DNPM, 2014; DNPM, 2015). A partir das informações obtidas nestes relatórios, foi elaborado um gráfico do comportamento do preço médio de venda FOB para o calcário agrícola (Figura 4.10), o qual é representado em grande parte pelo calcário dolomítico.

Figura 4.10 – Gráfico do preço médio de venda *Free on Board* (FOB) do calcário agrícola entre 2009 e 2014.



Fonte: O autor (2017)

A regressão linear pelo método dos mínimos quadrados dos dados da Figura 4.10 resultou na equação abaixo, cujo coeficiente de ajuste (R^2) foi 0,991, a qual foi utilizada para a realização da previsão para o ano de 2017, utilizado como referência em virtude do término deste trabalho.

$$\text{Preço de Venda (R\$/t)} = 2,9637 * \text{Período} + 20,062 \quad (4.5)$$

A partir da Eq. (4.5), calculando-se o preço de venda para o período 9, correspondente ao ano de 2017 (Figura 4.10), obteve-se um preço médio estimado de R\$ 46,16 por tonelada, o que representa um aumento de 96,67% em relação ao ano de 2009. Entretanto, com o intuito de se obter um empreendimento com um cenário econômico mais conservador, e portanto, menos sensível a grandes variações do mercado, optou-se por utilizar o valor de R\$ 40,00 por tonelada, aplicado ao calcário dolomítico agrícola, o qual representa grande parte das vendas. Para o calcário calcítico agrícola, através de pesquisas de preço, observou-se que o

calcário dolomítico apresenta, em média, um preço de venda 12,46% maior em relação ao calcítico. Diante disto, optou-se por utilizar o valor de R\$ 35,00 por tonelada para o calcário calcítico agrícola.

As características operacionais do empreendimento foram estabelecidas utilizando-se como referência um Plano de Aproveitamento Econômico (PAE) de calcário agrícola (BESSA JÚNIOR, 2009). Desta forma, considerou-se neste trabalho uma produção anual total de 144.000 toneladas de calcário agrícola (calcários calcítico e dolomítico). O regime de trabalho foi definido como sendo 300 dias operacionais por ano, 25 dias por mês e 8 horas por dia. Tal configuração resulta então em uma produção mensal total de 12.000 toneladas, e uma produção horária total de 60 toneladas.

As especificações dos equipamentos de lavra e processamento, quadro de pessoal e custos operacionais foram todas extraídas do PAE de calcário agrícola mencionado previamente, com modificações em algumas variáveis, principalmente as referentes aos custos operacionais, com o intuito de tornar os dados utilizados mais adequados ao momento da análise, já que o conteúdo do trabalho utilizado como referência é condizente com as condições econômicas do ano de 2009, diferentes das atuais.

Na etapa de lavra (extração) considerou-se que a mesma seria realizada pelo método de lavra em cava, com desmonte do material por explosivos, carregamento por pás-carregadeiras e transporte por caminhões basculantes, com a utilização de equipamentos de apoio para umidificação das vias de acesso de praça de operação. A quantidade e tipos de equipamentos de lavra que seriam utilizados estão descritos na Tabela 4.9, cujas quantidades estão compatíveis com a taxa de produção de 144.000 toneladas anuais.

Tabela 4.9 – Inventário de equipamentos de lavra com descrição e quantidade.

Descrição	Quantidade (Unidades)
Pá Carregadeira	2
Caminhão Basculante	4
Caminhão Pipa	1
Comboio de Lubrificação	1
Caminhão com Carroceria (Apoio)	1
Camionete (<i>Pick-Up</i>)	1
Perfuratriz Pneumática de Esteiras	1
Compressor de Ar	2
Marteletes	2

Fonte: (BESSA JÚNIOR, 2009)

O processamento do minério extraído da mina, efetuado para adequação dos produtos ao mercado consumidor, foi organizado em etapas conforme descrito no PAE previamente mencionado. Neste caso, o minério extraído é primeiramente estocado em um pátio no interior da usina, seguindo posteriormente para alimentadores vibratórios que alimen-

tam dois britadores de mandíbulas. Após a britagem, o material segue, por correia transportadora coberta, para uma pilha pulmão ao abrigo do tempo. Subsequentemente, o material é retornado ao processo por calha vibratória e transportado por correia coberta para uma pilha de alimentação de moinhos de martelos, os quais são alimentados por mesas vibratórias. Após a moagem o calcário é disposto em pilhas de estocagem, estando pronto para expedição. A descrição dos equipamentos de processo e respectivas quantidades está exposta na Tabela 4.10, extraída também do PAE, e compatível com a escala de produção de 144.000 toneladas anuais.

Tabela 4.10 – Inventário de equipamentos de processo com descrição e quantidades.

Descrição	Quantidade (Unidades)
Alimentador Vibratório	1
Britador de Mandíbulas	2
Calha Vibratória	1
Peneira Vibratória	2
Moinho de Martelos	2
Correia Transportadora	5

Fonte: (BESSA JÚNIOR, 2009)

A partir dos inventários de equipamentos de lavra e de processamento, estimou-se a quantidade de funcionários para o andamento das operações (Tabela 4.11), classificados de acordo com a área da operação (lavra e beneficiamento).

Tabela 4.11 – Quadro de pessoal de acordo com as áreas de produção.

Área	Descrição	Quantidade (Unidades)
Lavra	Engenheiro de Minas	1
	Operador de Pá Carregadeira	2
	Motoristas	7
	Operador de Perfuratriz	1
	Operário	2
	Vigia	1
Beneficiamento	Operador de Equipamentos	7

Fonte: O autor (2017)

As informações pertinentes aos equipamentos do empreendimento (lavra e processo) e ao quadro de pessoal foram utilizadas para a estimativa dos custos operacionais, os quais foram baseados também no PAE de calcário (BESSA JÚNIOR, 2009). Os custos operacionais constantes neste relatório, por serem representativos das condições econômicas e mercadológicas do ano de sua publicação (2009), foram alterados por meio de um fator, o qual refletiu o aumento dos preços de venda FOB em relação ao ano de publicação do PAE. O uso deste procedimento foi baseado no princípio de que os preços de venda livres de impostos e/ou encargos aumentam em função da elevação dos custos operacionais. Portanto, como

o preço de venda calculado pela Eq. (4.5) representa um aumento de 96,67% em relação ao ano de 2009 todos os custos operacionais constantes do relatório (PAE) foram multiplicados por 1,9667. A Tabela 4.12 mostra os custos operacionais da etapa de lavra, e a Tabela 4.13, os custos operacionais da etapa de processamento do calcário, ambos já modificados com o fator descrito.

Tabela 4.12 – Elementos da etapa de lavra e respectivos valores de custos operacionais unitários.

Itens de Custo	Custo Unitário (R\$/t)
Salários (sem encargos)	3,25
Encargos (60%)	1,95
Desmonte e Materiais de Manutenção	2,00
Combustível e Lubrificantes	3,77
Pneus e Câmaras	0,79
Manutenção Geral	0,90
Despesas Gerais	0,74
Controle de Qualidade, Ambiental, etc	1,25
Total	14,64

Fonte: O autor (2017)

Tabela 4.13 – Elementos da etapa de processamento e respectivos valores de custos operacionais unitários.

Itens de Custo	Custo Unitário (R\$/t)
Salários (sem encargos)	1,23
Encargos Salários (60%)	0,74
Energia Elétrica	5,41
Peças, Materiais de Desgaste e Manutenção	1,56
Total	8,93

Fonte: O autor (2017)

De posse dos parâmetros econômicos do empreendimento, procedeu-se com a inserção dos mesmos no inventário mineral de teores, resultando, ao final, no valor econômico de cada bloco do modelo. Para tal, antes de se realizar tais procedimentos, foi elaborada uma função em linguagem GENTRA no ambiente do Datamine Studio 3[®] para o cálculo e posterior inserção, em cada bloco do modelo, dos seguintes parâmetros: (i) Teor de CaCO₃; (ii) Teor de MgCO₃; (iii) Potencial de Neutralização (PN) (Código 4.1), e; (iv) massa específica (Código 4.2).

Os teores de CaCO₃ e MgCO₃ foram calculados conforme procedimento realizado previamente, na ocasião da determinação do diagrama ternário para classificação geológica (Eq. 4.1 e Eq. 4.2). Já o Potencial de Neutralização (PN) foi estabelecido conforme indica a IN 35/2006 (BRASIL, 2006), ou seja, a partir da determinação do total equivalente de CaCO₃ (% E CaCO₃). Desta forma, como o CaCO₃ é equivalente a 1,7884 * CaO e a 2,48 * MgO, o valor do PN foi calculado como a soma entre esses dois produtos. Portanto, o cálculo do PN foi realizado de acordo com a seguinte equação:

$$PN = (CaO * 1,7884) + (MgO * 2,48) \quad (4.6)$$

A massa específica de cada material foi fornecida pela empresa, a qual determinou um valor de 2,4 t/m³ para os calcários (CLC, MAG e DOL) e de 2,7 t/m³ para as rochas não carbonáticas (VMV). No caso do domínio CLI, o qual configura rochas carbonáticas com intercalações de rochas não carbonáticas, determinou-se que a massa específica seria a média aritmética entre os dois valores fornecidos pela empresa, uma vez que há presença de ambas litologias em tais amostras/blocos, o que resultou no valor de 2,55 t/m³.

Código 4.1 – Código para inserção dos valores de CaCO₃, MgCO₃ e PN.

```
SETC CACO3 –
SETC MGCO3 –
SETC IT1 –
SETC IT2 –
SETC PN –
MULC CACO3 CAO 1.7848
MULC MGCO3 MGO 2.0919
MULC IT1 CAO 1.7884
MULC IT2 MGO 2.48
ADD PN IT1 IT2
END
```

Código 4.2 – Código para atribuir a cada bloco do modelo a sua massa específica.

```
SETC DENSITY 2.7
EQC MODA 1
SETC DENSITY 2.4
EQC MODA 2
SETC DENSITY 2.4
EQC MODA 3
SETC DENSITY 2.4
EQC MODA 4
SETC DENSITY 2.55
END
```

Subsequentemente à adição dos parâmetros descritos anteriormente, procedeu-se, enfim, com a elaboração da função benefício para o cálculo do valor econômico de cada bloco do modelo de teores. Nesta etapa, para todos os efeitos, considerou-se como sendo minério os blocos classificados como calcários (CLC, MAG e DOL), incluídos nos recursos medidos ou indicados, e com PN maior ou igual a 80. Os demais materiais, os quais não cumprem pelo menos uma das restrições acima expostas, foram classificados como estéril, ou seja, não aproveitáveis economicamente.

O benefício unitário (BENT), por tonelada, foi calculado de maneira distinta para blocos de minério e de estéril. O valor adotado para os blocos de minério foi correspondente ao procedimento normal, de subtração entre receitas e despesas, conforme o tipo de produto

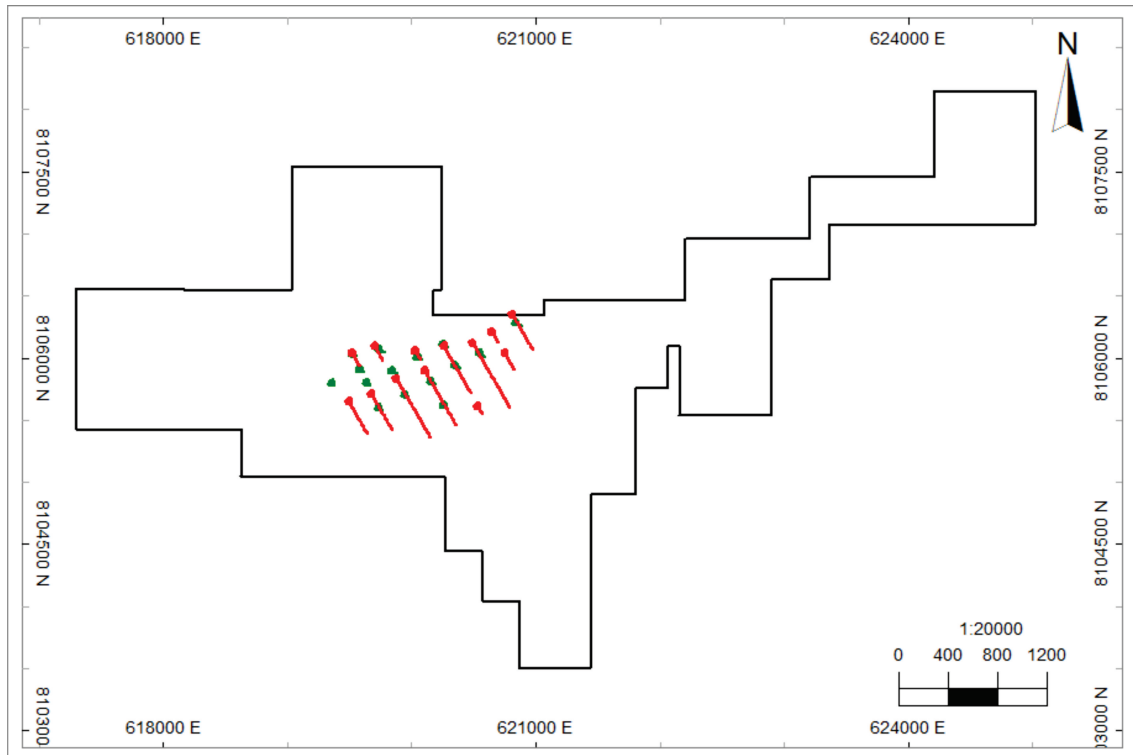
(calcário calcítico ou dolomítico). Já o benefício dos blocos de estéril, como estes representam apenas custos de lavra/extração, foi estabelecido como sendo o custo unitário de lavra. O benefício unitário de cada bloco foi multiplicado pela massa do bloco, em toneladas, obtendo-se então o valor econômico de cada bloco do modelo. O Código 4.3 mostra o código em GENTRA utilizado para a determinação do modelo econômico, ou seja, cálculo do benefício dos blocos.

O modelo econômico resultante foi então, importado para o programa NPV Scheduler 4[®] para a realização dos procedimentos relativos à otimização de cava. Para a determinação da superfície ótima de extração, além do modelo econômico, foi importado para o mesmo programa os limites da área concedida à empresa pelo DNPM (Figura 4.11), a qual condiciona o limite da cava, uma vez que não se deve haver extração de material fora dos limites outorgados pelo DNPM.

Código 4.3 – Código para o cálculo dos benefícios dos blocos (modelo econômico).

```
SETC CAMP –
SETC VOL –
SETC TON –
MUL CAMP XINC YINC
MUL VOL CAMP ZINC
MUL TON VOL DENSITY
SETC CL –14.64
SETC CP –8.93
SETC PV1 35
SETC PV2 40
SETC PV3 40
ADD CT CL CP
SETC BENT –14.64
MUL BENF BENT TON
EQC MODA 1
GEC CAO 0
LEC SCAO 2
GEC PN 80
ADD BENT PV1 CT
EQC MODA 1
GEC CAO 0
LEC SCAO 2
GEC PN 80
MUL BENF BENT TON
EQC MODA 2
GEC CAO 0
LEC SCAO 2
GEC PN 80
ADD BENT PV2 CT
EQC MODA 2
GEC CAO 0
LEC SCAO 2
GEC PN 80
MUL BENF BENT TON
EQC MODA 3
GEC CAO 0
LEC SCAO 2
GEC PN 80
ADD BENT PV3 CT
EQC MODA 3
GEC CAO 0
LEC SCAO 2
GEC PN 80
MUL BENF BENT TON
END
```

Figura 4.11 – Polígono que delimita a área de exploração do empreendimento.



Fonte: O autor (2017)

A partir de tais informações (modelo econômico e limites da cava) procedeu-se com a otimização de cava a partir do algoritmo de Lerchs-Grossmann (maximização do valor presente líquido), considerando-se uma taxa de produção de 144.000 toneladas anuais (300 dias operacionais por ano) e ângulo de inclinação da face da bancada de 70°. O resultado da aplicação de tal processo é a superfície ótima de extração, o qual otimiza (maximiza) o valor presente líquido.

Capítulo 5

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, abordar-se-á os resultados obtidos e suas respectivas interpretações. Os resultados serão apresentados de acordo com as etapas realizadas no estudo (modelagem geológica por krigagem indicadora, estimativa de teores, etc) na forma de tópicos, cada tópico correspondente a uma etapa, culminando, por fim, na otimização de cava, à qual estão atribuídos os resultados finais do trabalho.

5.1 Análise Estatística Exploratória

Como mencionado, previamente procedeu-se com uma análise exploratória das informações amostrais por meio de parâmetros estatísticos, cujos resultados estão aqui dispostos na forma de tabelas e figuras (histogramas). Desta forma, encontra-se na Tabela 5.1 e na Tabela 5.2 a descrição dos resultados das estatísticas dos óxidos CaO e MgO, respectivamente. Os histogramas dos dois óxidos para as unidades CLC, MAG, DOL, CLI e VMV se encontram, respectivamente, nas Figuras 5.1, 5.2, 5.3, 5.4 e 5.5.

Tabela 5.1 – Principais parâmetros estatísticos da variável CaO.

Domínio	Amostras	Mínimo (%)	Média (%)	Mediana (%)	Máximo (%)	Desvio P. (%)	Variância (%) ²	Assimetria	Curtose
CLC	231	38,50	45,24	45,45	54,60	2,89	8,33	-0,01	-0,56
CLI	46	20,00	33,64	34,75	41,00	5,54	30,66	-0,50	-0,82
MAG	77	28,00	37,97	38,40	46,60	4,47	19,94	-0,15	-0,77
DOL	47	26,60	30,49	30,10	36,50	2,55	6,50	0,63	-0,57
VMV	52	0,90	16,82	22,03	27,00	8,68	75,33	-0,52	-1,29
Total	453	0,90	38,04	41,50	54,60	10,30	106,03	-1,38	1,87

Fonte: O autor (2017)

Tabela 5.2 – Principais parâmetros estatísticos da variável MgO.

Domínio	Amostras	Mínimo (%)	Média (%)	Mediana (%)	Máximo (%)	Desvio P. (%)	Variância (%) ²	Assimetria	Curtose
CLC	231	0,20	1,59	1,40	4,85	1,37	1,87	0,76	-0,58
CLI	46	0,20	3,18	0,90	13,50	3,98	15,86	1,16	-0,10
MAG	77	5,00	8,23	8,15	12,00	2,17	4,70	0,17	-1,21
DOL	47	12,40	14,04	13,50	18,25	1,48	2,18	0,97	0,06
VMV	52	0,10	1,12	0,94	4,35	0,89	0,80	2,21	5,05
Total	453	0,10	4,12	1,90	18,25	4,60	21,12	1,18	0,15

Fonte: O autor (2017)

Os teores da variável CaO, como pode se observar na Tabela 5.1, apresentam-se notadamente mais elevados no domínio do calcário calcítico. Os demais domínios de rochas calcárias apresentaram valores menores de CaO, particularmente o domínio do calcário dolomítico. Nota-se também a quantidade significativa de amostras referentes ao calcário calcítico, as quais representam 51% do total amostrado. Quanto às variâncias, os maiores valores estão atribuídos aos domínios classificados como calcário “impuro” e rochas não-carbonáticas, o que pode ser um reflexo, particularmente na categoria VMV, de mistura de litologias diferentes (gnaisse, xisto, quartzito, etc.), e portanto, como assembleias mineralógicas distintas, e que foram tratados como um domínio único pela impossibilidade de serem tratados individualmente em virtude da quantidade muito limitada de amostras.

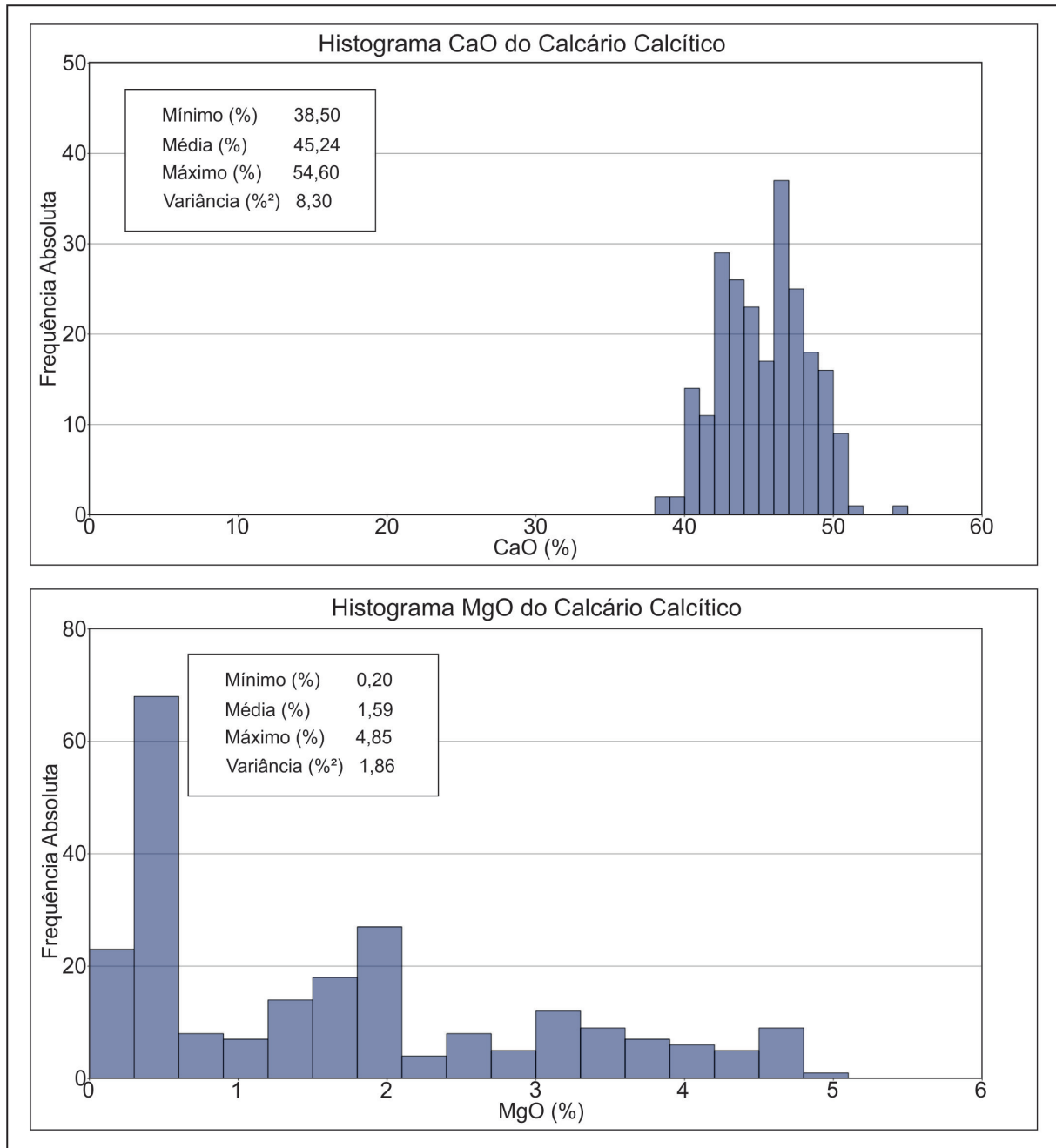
Os teores de MgO, conforme pode ser notado na Tabela 5.2, ao contrário do observado para o óxido CaO, apresentaram os menores valores no domínio do calcário calcítico, o que mostra claramente a alta razão calcita/dolomita característica deste tipo de calcário. Já o calcário dolomítico apresentou os maiores valores deste óxido, o que é consequência da maior presença de dolomita neste calcário em relação aos demais. Quanto à variância, os maiores valores estão associados aos calcários “impuro” e magnesiano, ambos por apresentarem um intervalo amplo de variação de teores deste óxido em comparação com os demais domínios litológicos.

Na distribuição dos teores da unidade CLC (Figura 5.1) pode-se notar, no histograma da variável CaO, apenas a presença de teores elevados desta variável, com uma distribuição aproximadamente simétrica. Quanto ao histograma dos teores de MgO, nota-se uma grande proporção de teores baixos, com 95 amostras com teores menores que 0,46% aproximadamente, representando 41,12% do total de amostras desta unidade. Além disso, percebe-se uma assimetria positiva, ou à direita, para a variável MgO.

Na unidade de Calcário Magnesiano (MAG), conforme pode ser observado na Figura 5.2, o histograma dos teores da variável CaO mostra uma distribuição aparentemente simétrica, ou com uma pequena assimetria negativa – à esquerda, mostrando uma maior proporção de altos teores deste óxido. Já a distribuição da variável MgO mostra uma uniformidade significativa das frequências absolutas.

A unidade de Calcário Dolomítico (DOL), de acordo com a Figura 5.3, apresentou, em termos gerais, teores de CaO menores em relação à unidade anterior (MAG), com uma distribuição levemente assimétrica positiva – à direita, com as maiores frequências entre os teores de 28,25% e 31,55% aproximadamente, representando 46,81% do total amostrado. Já a variável MgO apresentou os maiores teores dentre as cinco unidades, com uma quantidade expressiva de amostras entre 12,40% e 13,24% aproximadamente, compreendendo 44,68% do total de amostras nesta categoria, evidenciando uma clara assimetria positiva – à direita.

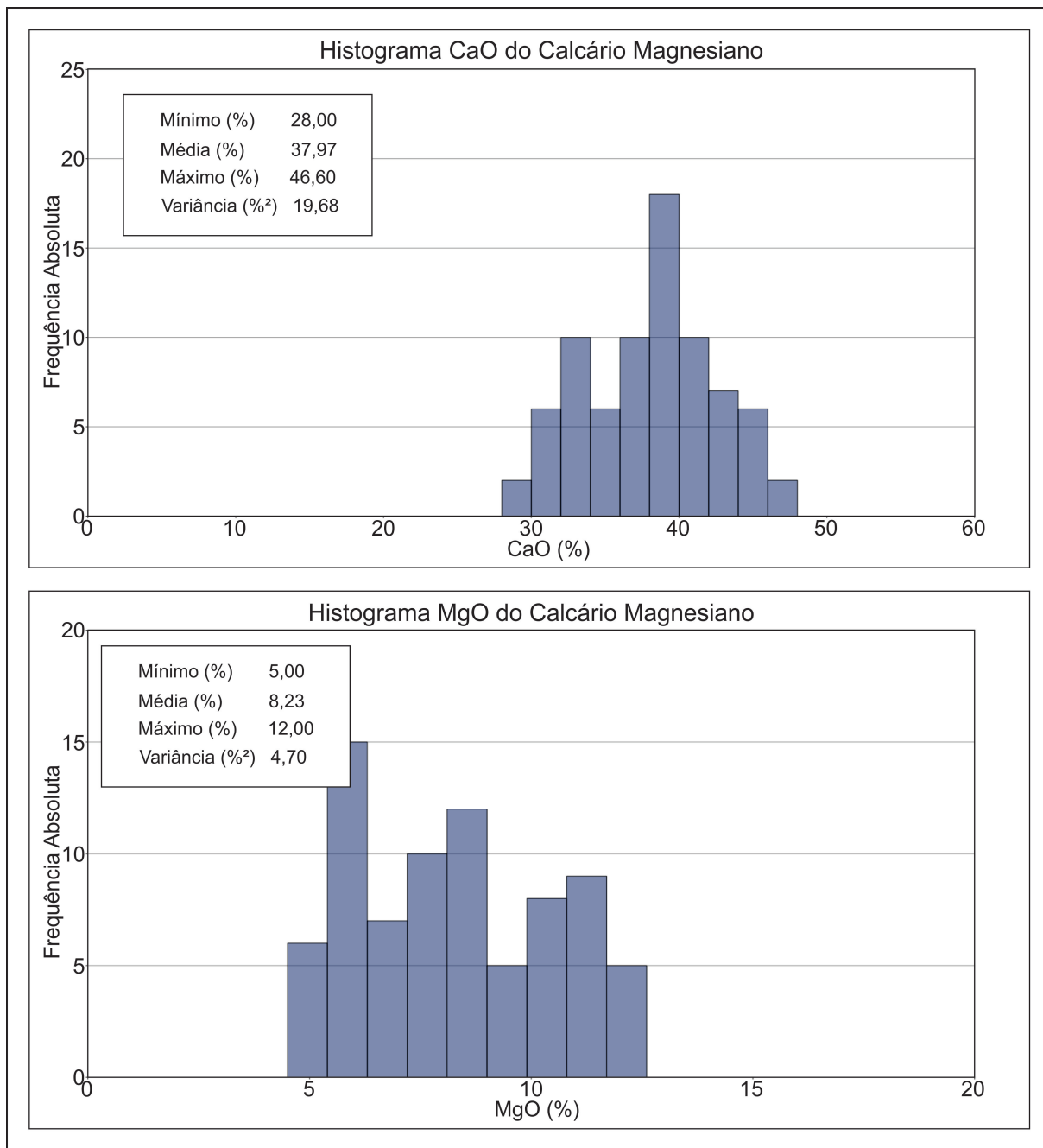
Figura 5.1 – Histograma dos valores amostrais dos óxidos CaO e MgO para a categoria CLC.



Fonte: O autor (2017)

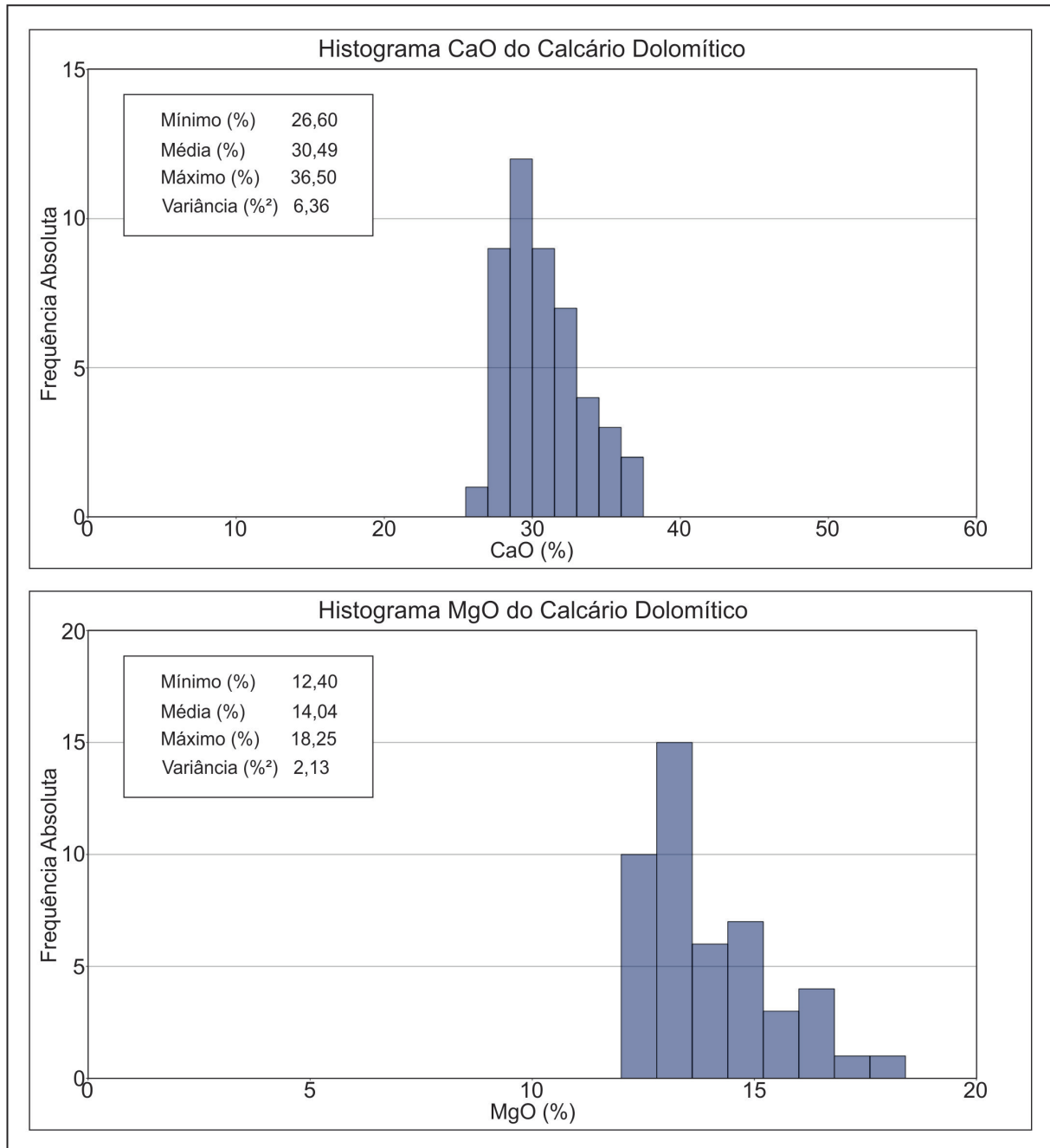
Na unidade de “Calcário Impuro” (Figura 5.4) nota-se uma grande variação dos teores de CaO, de 20% a 41%, com maior proporção de teores próximos de 40%, evidenciando uma assimetria negativa – à esquerda. O mesmo comportamento pode ser observado na variável MgO, cujos teores variam de 0,2% a 13,5%, no entanto com assimetria positiva – à direita. Tais comportamentos, de grande variação de teores, provavelmente estão associados à presença de mais de um tipo de calcário, e intercalados por rochas não carbonáticas.

Figura 5.2 – Histograma dos valores amostrais dos óxidos CaO e MgO para a categoria MAG.



Fonte: O autor (2017)

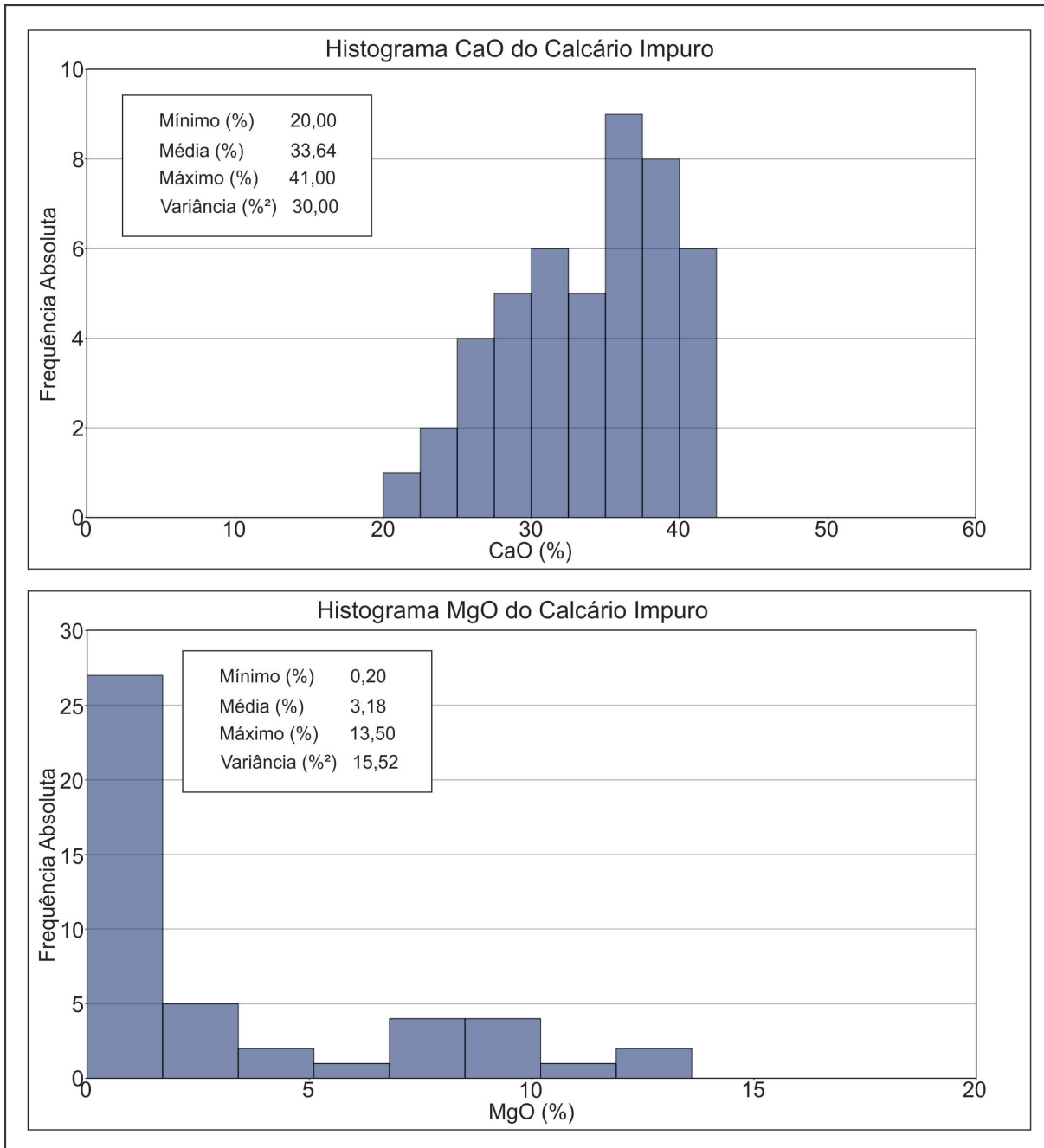
Figura 5.3 – Histograma dos valores amostrais dos óxidos CaO e MgO para a categoria DOL.



Fonte: O autor (2017)

Por fim, a unidade VMV, composta de rochas não carbonáticas, apresentou, como pode ser observado na Figura 5.5, uma distribuição amostral de teores de CaO caracterizada pela possível presença de mais de uma população. Tal ocorrência seria possível porque, de fato, estão contidas nessa unidade diferentes tipos de rocha, cada qual dotadas de uma distribuição estatística específica. Já o histograma da variável MgO não mostra, a princípio, a provável ocorrência de mais de uma população nesta unidade. Isto exposto, seria fundamental, para uma melhor quantificação, não só desta, mas das demais unidades, a coleta de mais informações (amostras), as quais forneceriam informações adicionais importantes.

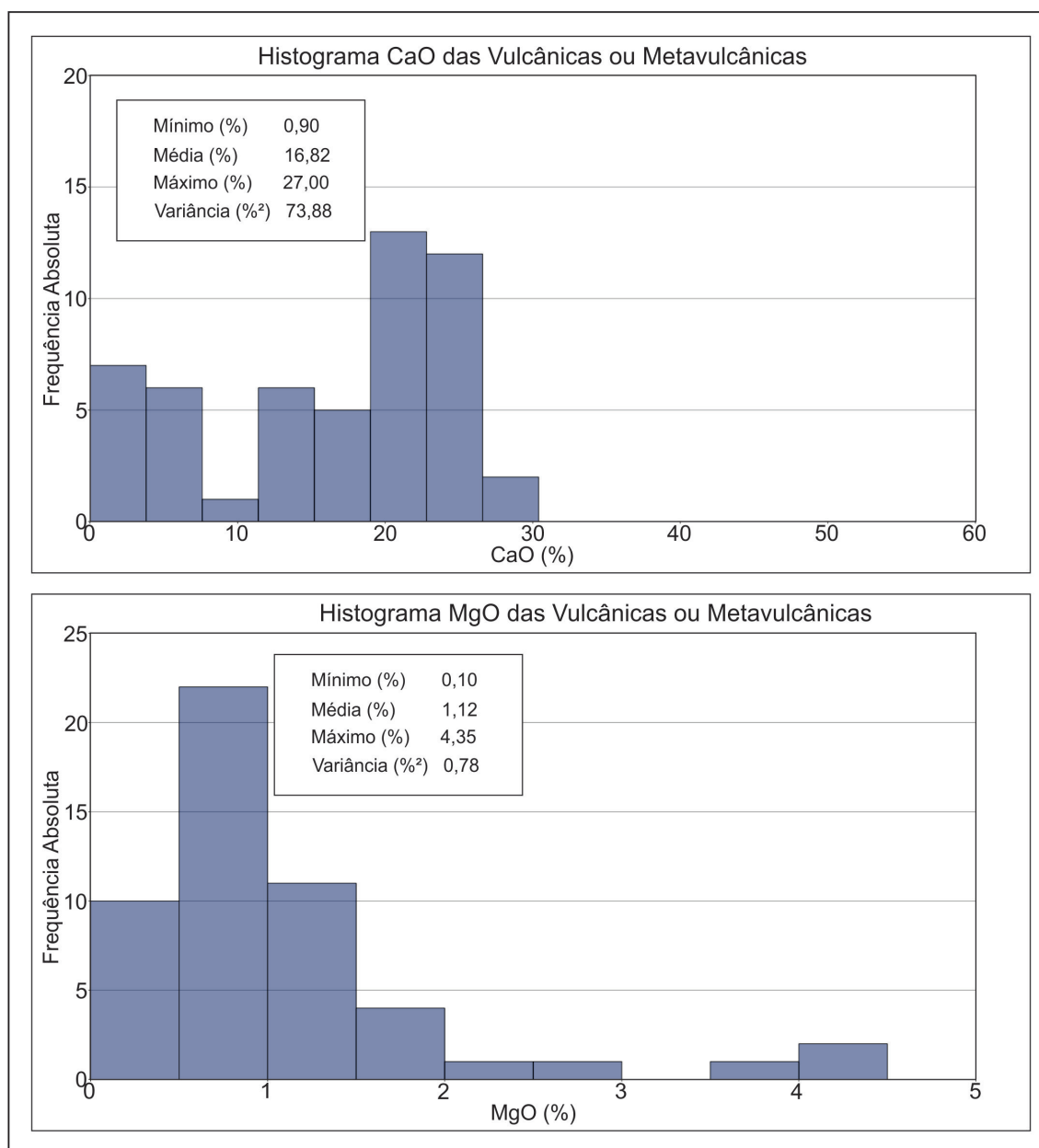
Figura 5.4 – Histograma dos valores amostrais dos óxidos CaO e MgO para a categoria CLI.



Fonte: O autor (2017)

Observa-se, em relação à unidade VMV, que embora haja uma possibilidade da presença de mais de uma população geológica na mesma, a conservação desta unidade se justifica pelos seguintes fatos: (i) a retirada de amostras desta unidade agravaria ainda mais o problema relativo à falta de amostras para a realização dos estudos variográficos e para as estimativas de teores; e, (ii) esta unidade representa basicamente rochas não carbonáticas, as quais são classificadas como estéril pela empresa, ou seja, são resíduos da lavra, e portanto não são enviadas para o processamento, qualquer que seja o tipo de rocha.

Figura 5.5 – Histograma dos valores amostrais dos óxidos CaO e MgO para a categoria VMV.



Fonte: O autor (2017)

Os resultados obtidos quanto aos intervalos de confiança para a média (Tabela 5.3) mostraram que as médias amostrais estão contidas nos respectivos intervalos, o que indica que estas, supondo que as distribuições são normais, representam as respectivas médias populacionais, já que estão contidas nos intervalos de valores possíveis para a média.

No caso da variância, os resultados obtidos (Tabela 5.4) mostraram que as variâncias amostrais, no nível de significância considerado, também são representativas das respectivas variâncias populacionais, já que todos os seus valores estão dentro dos respectivos intervalos de confiança.

Tabela 5.3 – Resultados dos intervalos de confiança da média para os óxidos CaO e MgO classificados por domínio litológico.

Unidade	Variável	Média (%)	Limite Inferior (IC 95%)	Limite Superior (IC 95%)
CLC	CaO	45,24	44,87	45,62
	MgO	1,59	1,42	1,77
MAG	CaO	37,97	36,96	38,99
	MgO	8,23	7,74	8,72
DOL	CaO	30,49	29,74	31,24
	MgO	14,04	13,60	14,47
CLI	CaO	33,64	32,00	35,29
	MgO	3,18	2,00	4,36
VMV	CaO	16,82	14,41	19,24
	MgO	1,12	0,87	1,37

Fonte: O autor (2017)

Tabela 5.4 – Resultados dos intervalos de confiança da variância para os óxidos CaO e MgO classificados por domínio litológico.

Unidade	Variável	Variância (%) ²	Limite Inferior (IC 95%)	Limite Superior (IC 95%)
CLC	CaO	8,34	7,00	10,10
	MgO	1,87	1,57	2,26
MAG	CaO	19,94	14,90	28,20
	MgO	4,70	3,50	6,65
DOL	CaO	6,50	4,49	10,25
	MgO	2,18	1,50	3,43
CLI	CaO	30,66	21,10	48,60
	MgO	15,86	10,90	25,20
VMV	CaO	75,33	52,90	115,80
	MgO	0,80	0,56	1,22

Fonte: O autor (2017)

5.2 Modelagem Geológica

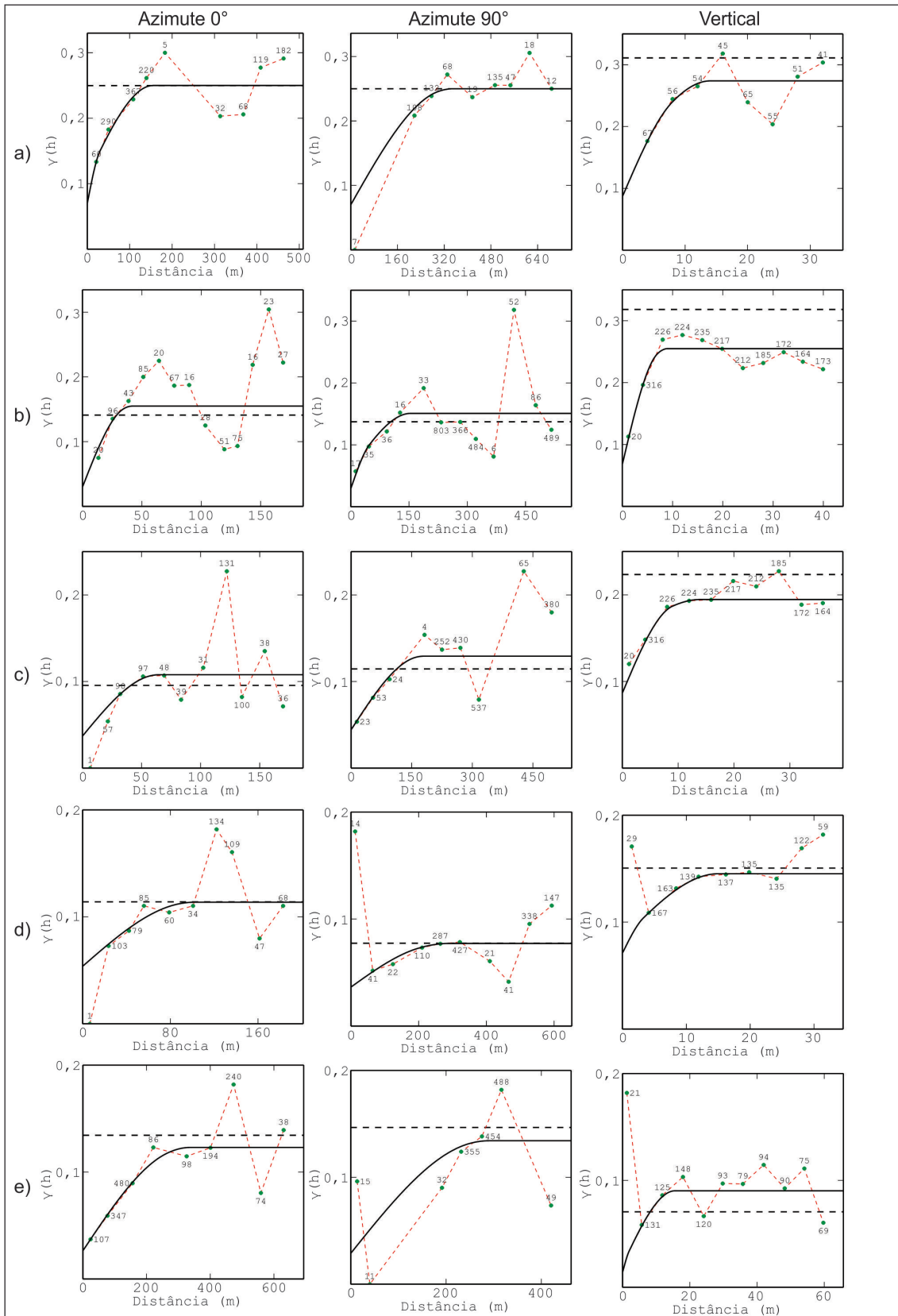
Esta etapa, como mencionado previamente, foi efetuada a partir de uma abordagem geoestatística (krigagem indicadora). No modelo resultante, a estimativa das probabilidades de ocorrência de cada categoria foi baseada na continuidade geológica de cada uma, estabelecida por meio dos variogramas indicadores. O ajuste teórico dos mesmos resultou nas curvas expostas na Figura 5.6, cujos parâmetros dos respectivos ajustes (tipo de estrutura, alcance e patamar) estão apresentados na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Parâmetros dos ajustes variográficos de acordo com cada categoria geológica.

Domínio	Orientação	Efeito Pepita	Estrutura 1			Estrutura 2		
			Modelo 1	Contribuição	Alcance	Modelo 2	Contribuição	Alcance
CLC	Azimute 0°	0,070	Esférico	0,040	30,00	Esférico	0,140	125,00
	Azimute 90°	0,070	Esférico	0,040	300,00	Esférico	0,140	51,00
	Vertical	0,070	Esférico	0,035	8,00	Esférico	0,115	6,00
MAG	Azimute 0°	0,030	Esférico	0,030	35,00	Esférico	0,095	7,00
	Azimute 90°	0,030	Esférico	0,030	48,00	Esférico	0,095	106,00
	Vertical	0,030	Esférico	0,030	7,00	Esférico	0,053	2,00
DOL	Azimute 0°	0,036	Esférico	0,010	60,00	Esférico	0,059	5,00
	Azimute 90°	0,036	Esférico	0,010	160,00	Esférico	0,059	20,00
	Vertical	0,036	Esférico	0,026	9,00	Esférico	0,019	5,00
CLI	Azimute 0°	0,043	Esférico	0,008	90,00	Esférico	0,040	13,00
	Azimute 90°	0,043	Esférico	0,008	200,00	Esférico	0,040	90,00
	Vertical	0,043	Esférico	0,008	3,30	Esférico	0,037	11,70
VMV	Azimute 0°	0,020	Esférico	0,010	265,00	Esférico	0,063	72,00
	Azimute 90°	0,020	Esférico	0,010	250,00	Esférico	0,063	40,00
	Vertical	0,020	Esférico	0,010	2,00	Esférico	0,100	13,60

Fonte: O autor (2017)

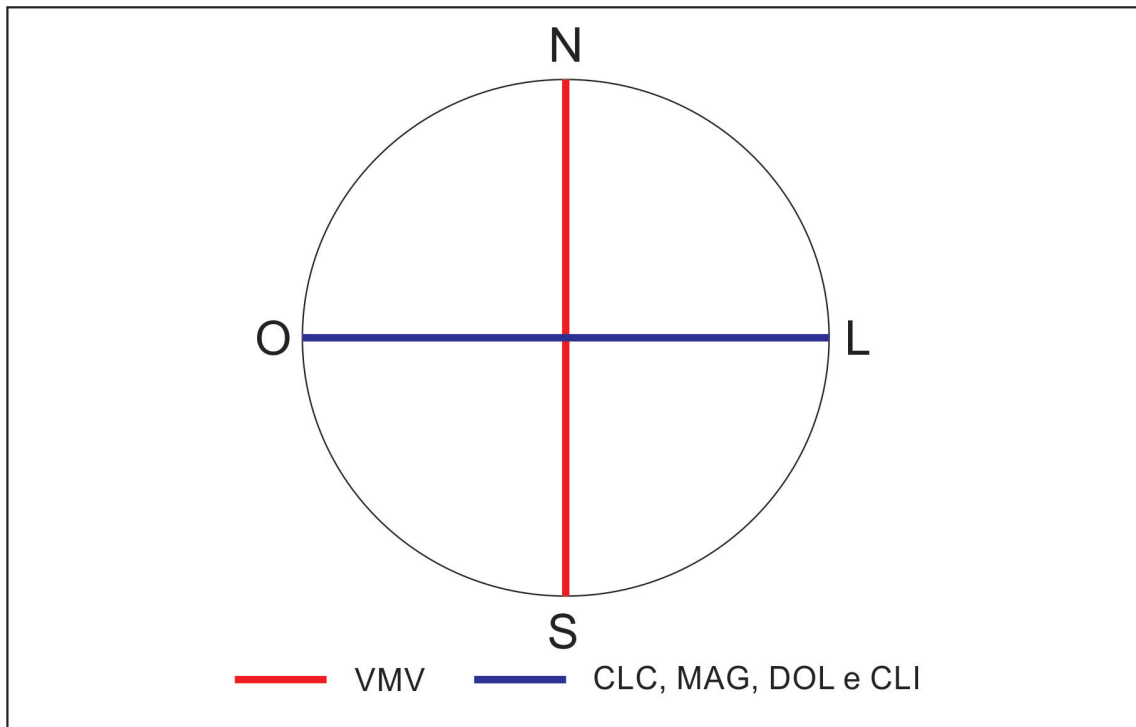
Figura 5.6 – Variogramas indicadores experimentais (linhas vermelhas com traços) e respectivas curvas teóricas (linhas pretas contínuas). A linha tracejada na horizontal representa a variância *a priori*. Os domínios litológicos estão classificados como: a) CLC, b) MAG, c) DOL, d) CLI, e) VMV.



Fonte: O autor (2017)

Através dos parâmetros dos ajustes variográficos da Tabela 5.5 observa-se que as direções de maior e menor continuidade geológica, exceto no domínio VMV, foram as direções leste e norte, respectivamente (Figura 5.7). Tal fato torna evidente que os corpos geológicos (calcários) apresentam maior extensão física na direção leste e menor na direção norte, com razão de anisotropia máxima de 3,67:1, atribuída ao calcário magnesiano (MAG), enquanto as demais categorias apresentaram uma razão média de 2,61:1.

Figura 5.7 – Categorias geológicas e respectivas orientações de maior continuidade geológica.



Fonte: O autor (2017)

O domínio litológico VMV, atribuído às rochas não carbonáticas, apresentou maior e menor continuidade geológica nas direções norte e leste, respectivamente (Figura 5.7), situação oposta ao observado nos demais domínios litológicos, representados pelos calcários. Tal aspecto reflete o processo distinto de gênese desta unidade. Enquanto os calcários foram formados por processo de deposição de carbonatos, esta condicionada às condições geológicas específicas à época da deposição e subsequente diagênese, as rochas não carbonáticas foram originadas por processos magmáticos, pela intrusão de rochas vulcânicas nas lentes de calcário, essas estruturalmente orientadas de acordo com este evento. Além disso, a região foi submetida a um processo de metamorfismo de escala regional. Portanto, as diferenças entre as continuidades geológicas dos calcários e das rochas não carbonáticas, como era de se esperar, são uma evidência dos distintos processos geológicos de formação das mesmas, diferenciados estruturalmente entre si.

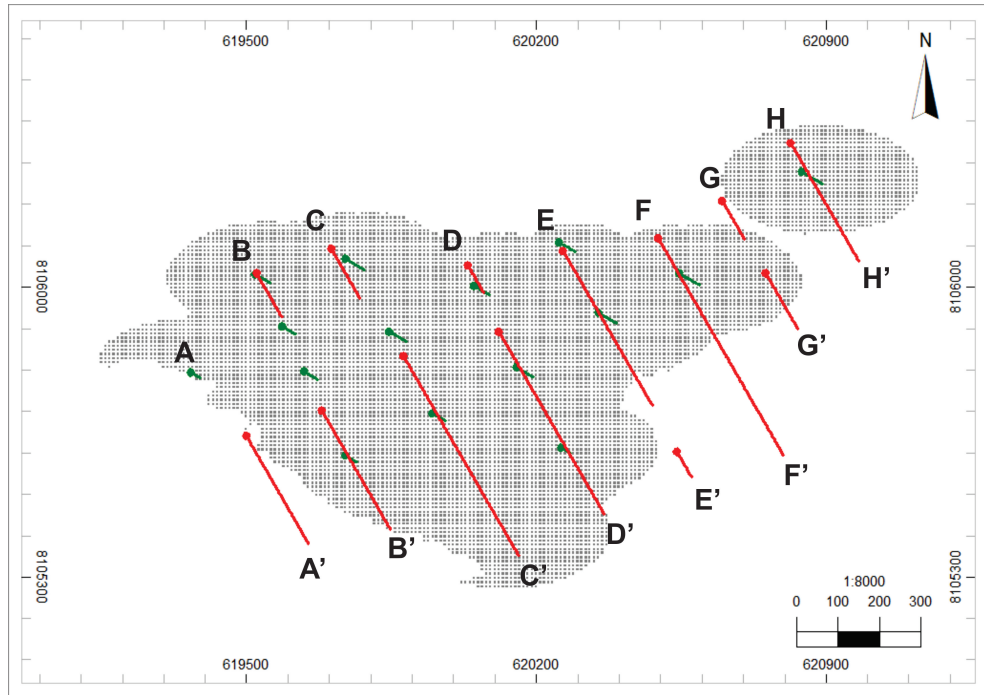
No que tange aos variogramas experimentais e os respectivos ajustes (Figura 5.6) pode-se notar que, de maneira geral, foi possível obter pares de amostras a distâncias relativamente moderadas, geralmente menores que 100 metros. Entretanto, alguns variogramas experimentais não demonstraram sua forma de crescimento bem definida, como por exemplo os variogramas das categorias CLC e VMV, ambos na direção leste, e da unidade DOL, na direção norte. Os ajustes teóricos dos variogramas indicadores acompanharam o crescimento dos valores de $\gamma(h)$ em função da distância, exceto nos variogramas onde não se obteve claramente a forma de crescimento dos mesmos, cujos ajustes foram baseados nos demais variogramas da unidade e em inferências sobre seu crescimento.

A ocorrência de variogramas com crescimento pobremente definido na direção leste pode estar atribuída à maior distância entre amostras nesta direção, impossibilitando a ocorrência de pares de amostras em valores relativamente menores de h . Desta forma, a inclusão de novas informações geológicas (furos de sondagem) melhoraria substancialmente os variogramas nessas unidades (experimentais e ajustes teóricos associados), e, portanto, a definição dos contatos geológicos.

No modelo geológico resultante foram feitas seções transversais para a uma primeira análise - comparativa - dos resultados, conforme indicado na Figura 5.8. A comparação, em cada seção transversal, entre os domínios litológicos estimado e amostral evidenciou uma boa aderência entre a amostragem e o modelo, conforme pode ser observado nas seções da Figura 5.9 e da Figura 5.10. As demais seções verticais estão expostas no Apêndice A (Figuras A.2 à A.9). A partir de tais considerações, em termos gerais, a abordagem probabilística se mostrou eficiente em descrever os formatos dos corpos geológicos.

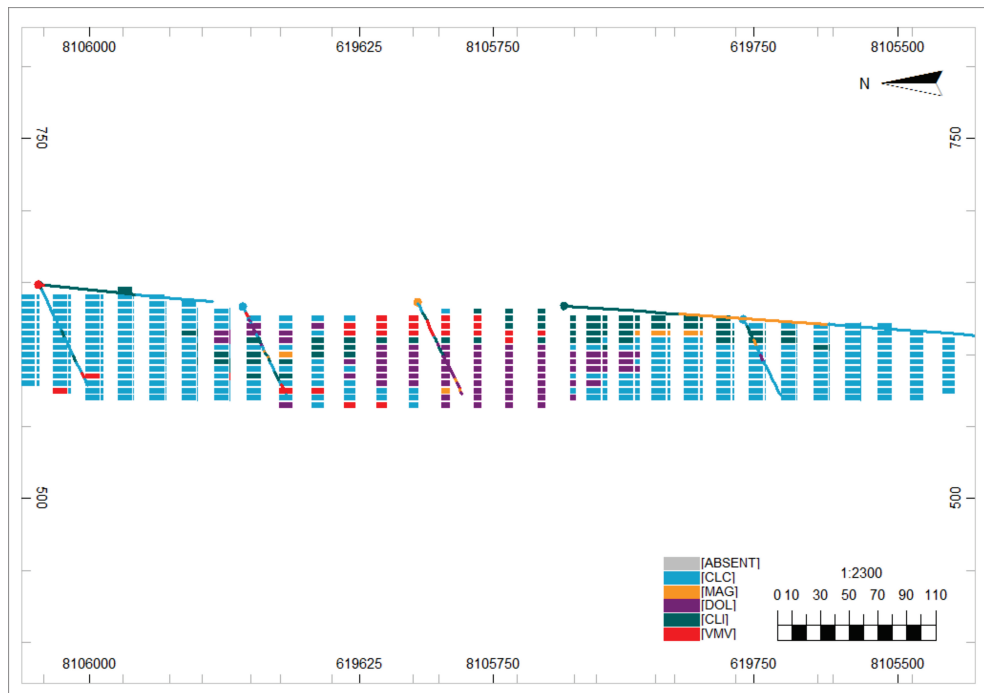
Comparando a proporção amostral de cada unidade com a proporção obtida no modelo probabilístico da respectiva unidade (Figura 5.11) percebe-se que aparentemente houve uma sobrestimativa da unidade/categoria CLC, enquanto as demais se mostraram subestimadas.

Figura 5.8 – Demarcação e codificação das seções verticais. Os furos de sondagem são indicados pelas linhas em verde, e as canaletas, pelas linhas em vermelho.



Fonte: O autor (2017)

Figura 5.9 – Seção vertical “B” do modelo geológico mostrando os domínios geológicos e estimados e amostrais em cores correspondentes.



Fonte: O autor (2017)