



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

Câmpus de Rio Claro



Programa de Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente

MODELAGEM GEOESTATÍSTICA DO DEPÓSITO DE TERRAS RARAS
ÁREA ZERO, ARAXÁ (MG)

ADRIANO SANTOS DELGADO DE OLIVEIRA

Orientador: Prof. Dr. Washington Barbosa Leite Júnior

Rio Claro (SP)

2017

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

“Júlio de Mesquita Filho”

Instituto de Geociências e Ciências Exatas

Campus de Rio Claro

ADRIANO SANTOS DELGADO DE OLIVEIRA

MODELAGEM GEOESTATÍSTICA DO DEPÓSITO DE TERRAS
RARAS ÁREA ZERO, ARAXÁ (MG)

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

Orientador: Prof. Dr. Washington Barbosa Leite Júnior

Rio Claro – SP

2017

O48m

Oliveira, Adriano Santos Delgado de
Modelagem geoestatística do depósito de terras raras Área
Zero, Araxá (MG) / Adriano Santos Delgado de Oliveira. -- Rio
Claro, 2017
77 f. : il., tabs., fotos, mapas

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista
(Unesp), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro
Orientador: Washington Barbosa Leite Junior

1. Geologia. 2. Métodos estatísticos. 3. Elementos terras
raras. 4. Krigagem ordinária. 5. Estimativa de recursos. I.
Título.

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

Essa ficha não pode ser modificada.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

“Júlio de Mesquita Filho”

Instituto de Geociências e Ciências Exatas

Campus de Rio Claro

ADRIANO SANTOS DELGADO DE OLIVEIRA

MODELAGEM GEOESTATÍSTICA DO DEPÓSITO DE TERRAS
RARAS ÁREA ZERO, ARAXÁ (MG)

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

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Washington Barbosa Leite Júnior

Prof. Dr. César Augusto Moreira

Dr. Sérgio Antonio Cáceres Contreras

Resultado: Aprovado

Rio Claro, SP 19 de outubro de 2017

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP).

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos.

Ao Prof. Dr. Washington Barbosa Leite Júnior pela orientação nos momentos finais da conclusão do trabalho.

Ao Prof. Dr. José Ricardo Sturaro, orientador prévio, pelo apoio no desenvolvimento inicial dessa pesquisa.

À empresa ITAFÓS Fertilizantes pela disponibilização dos dados para a geração dos produtos do presente trabalho.

À empresa ARANZ Geo por disponibilizar treinamento e licença temporária do Leapfrog Geo e à Estanho de Rondônia S/A por disponibilizar o uso do Datamine.

Encerro agradecendo a todos que contribuíram direta ou indiretamente para a conclusão desse trabalho.

Machines take me by surprise with great frequency

Alan Turing

RESUMO

O depósito de elementos terras raras (ETR) Área Zero localiza-se no município de Araxá, Minas Gerais. Situa-se na porção sul da Faixa Brasília, na Província Ígnea do Alto Paranaíba, inserido no Complexo Alcalino-Carbonatítico do Barreiro. O complexo é uma intrusão circular, com aproximadamente 16 km² de área. Apresenta-se como uma estrutura dômica associada a uma complexa rede de diques concêntricos e radiais, bem como pequenos veios. A mineralização é resultado do enriquecimento supergênico das rochas carbonatíticas, ricas em ETR. A área de estudos encontra-se na porção norte do complexo, em uma área de 400 m x 200 m, com seu eixo maior orientado segundo a direção E-W. O objetivo do trabalho foi a construção do modelo geológico tridimensional (3D) do depósito associado à quantificação dos recursos através do método de krigagem ordinária. O modelo 3D foi construído através da confecção e análise de 7 seções geológicas utilizando 60 furos de sondagem diamantada. Análises estatísticas foram realizadas para caracterizar e descrever as distribuições dos dados permitindo visualizar o comportamento das variáveis de interesse do depósito. Para executar a krigagem ordinária, o modelo esférico foi ajustado para os variogramas experimentais direcionais. A variografia indicou que a direção de maior continuidade do depósito foi a de 22,5/0 com amplitude de 51 metros. O modelo de blocos foi construído com as dimensões 10 x 10 x 3 m utilizado para a estimativa de recursos por unidades do depósito (solo residual, colúvio/alúvio, intervalo caulínico e carbonatito saprolitizado). Todas as unidades presentes no depósito estão mineralizadas. Os recursos do depósito totalizam 10,5 milhões de toneladas com teor médio de 4,75 % de óxidos totais de terras raras.

Palavras chave: Geologia. Métodos estatísticos. Elementos terras raras. Krigagem ordinária. Estimativa de recursos.

ABSTRACT

The “Área Zero” deposit is in Araxá city, Minas Gerais. It is located in the southern portion of the Brasília Belt, in the Igneous Province of Alto Paranaíba, inserted in the Barreiro Alkaline-Carbonatitic Complex. The complex is a circular intrusion with approximately 16 km². It is a dome structure associated with a complex system of concentric and radial dikes and small veins. The mineralization is a result of the supergene enrichment of carbonatitic rocks, with high levels of rare earth elements (REE). The study area is in the northern portion of the complex, in an area of 400 m by 200 m with its major axis oriented in the East-West (E-W) direction. This study aimed to create a three-dimensional model (3DM) related to the resources quantification from ordinary kriging method. The 3DM was built through the analysis of 7 geological sections with 60 borehole data in E-W direction. Statistical analyses were performed to characterize and describe the data distributions, allowing identify and select the interest variables from the deposit. To carry out ordinary kriging, a spherical model was fitted over experimental directional variograms. Plotting experimental variograms in different directions showed that the direction of greater continuity was 22,5/0 and 51 meters range. To estimate the REE grade, a block model was built with dimensions of 10 x 10 x 3 m to estimate resources by units (residual soil, colluvium/alluvium, kaolin, and saprolite – carbonatite). All the units present in the deposit area are mineralized. The resources of Area Zero deposit totaled 10,5 million tons with 4,75% of REE content.

Key words: Geology. Statistic method. Rare Earth elements. Ordinary kriging. Resource estimate.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Histograma de dados hipotéticos mostrando a posição da moda, mediana e média em um conjunto de dados. Os números de dados de cada classe estão indicados no interior das barras (SINCLAIR; BLACKWELL, 2004).	16
Figura 2 - Exemplo de curva de distribuição normal típica (A). Gráficos da função densidade de probabilidade da distribuição normal (B) (CORREA, 2003).	17
Figura 3 - Exemplo de distribuição lognormal para dados percentuais de cobre (Cu). N representa o número de amostras e B.I. o intervalo de classe. (SINCLAIR; BLACKWELL, 2004).	18
Figura 4 - Variograma típico e suas propriedades (YAMAMOTO, 2001).	22
Figura 5 - Comportamento do variograma próximo à origem. (A) Altamente contínuo ou parabólico; (B) Contínuo ou linear; (C) Descontínuo ou Efeito Pepita e; (D) Aleatório ou Efeito Pepita Puro (SARMA, 2009).	23
Figura 6 - Anisotropia Geométrica (A), Zonal (B) e Mista (C) (YAMAMOTO, 2001).	24
Figura 7 - Desenho esquemático mostrando como se define a direção do variograma, número de passos, tolerância angular, tolerância e largura máxima (YAMAMOTO, 2001).	25
Figura 8 - Exemplos de modelos de variograma comumente utilizados: (A) Função Power; (B) Modelo Esférico; (C) Modelo Exponencial; (D) Modelo Gaussiano e (E) Modelo Cúbico (SARMA, 2009). O patamar indicado como C será chamado de C_0+C	26
Figura 9 - Mapa de localização do município de Araxá em território Nacional e a posição do depósito em relação à área urbana do município.	30
Figura 10 - Ocorrências de rochas alcalinas e alcalino-carbonatíticas na porção Sul do Brasil. A Província Ígnea do Alto Paranaíba está destacada. (Modificado de TRAVERSA et al., 2001).	32
Figura 11 - Localização do Complexo Alcalino-Carbonatítico do Barreiro na Porção Sul da Faixa Brasília (Modificado de SILVA et al., 2006).	33
Figura 12 - Localização da área de estudos (depósito Área Zero) na interpretação geológica do Complexo Alcalino-Carbonatítico do Barreiro (Modificado de TRAVERSA et al., 2001).	35
Figura 13 - Coluna estratigráfica esquemática evidenciando os litotipos encontrados na área do depósito a partir dos testemunhos de sondagem.	37
Figura 14 – Mapa com a localização dos furos de sondagem diamantada utilizados nesse trabalho, na área do depósito.	39
Figura 15 – Mapa de elevação do terreno para a área de estudos.	43
Figura 16 - Superfície topográfica da área de estudos com a posição espacial dos furos de sondagem utilizados para esse trabalho. O eixo Y indica o Norte.	44
Figura 17 – Mapa da área de estudos com posição dos furos de sondagem e localização das seções.	44
Figura 18 – Visão em perspectiva da localização das seções (linhas brancas) confeccionadas para a criação do modelo tridimensional do depósito. O eixo Y indica o Norte.	45
Figura 19 - Seções geológicas do Depósito Área Zero utilizadas para a confecção do modelo 3D.	46
Figura 20 - Modelo tridimensional da área de estudos com a relação lateral entre as unidades presentes no depósito. O eixo Y indica o Norte.	47

Figura 21 - Vista em planta de cortes no modelo geológico nas cotas: 1075 m, 1070 m e 1065 m.	48
Figura 22 - Vista em planta de cortes no modelo geológico nas cotas: 1060 m, 1055 m e 1050 m.	49
Figura 23 - Histograma da espessura das amostras antes da regularização (A) e após a regularização para 1 m (B).	50
Figura 24 - Histograma dos teores de TREO (%) após a regularização das amostras.	52
Figura 25 - Histograma dos teores de TREO (%) para as diferentes unidades: Solo (A), Intervalo Caulinitico (B), Colúvio/Alúvio (C), Laterita (D), Saprolito (E) e Carbonatito (F).	54
Figura 26 - Variograma omnidirecional para os teores de TREO. Efeito pepita: 8; Patamar: 13; Amplitude: 40.	56
Figura 27 - Variograma direcional (67,5/0) para os teores de TREO. Efeito pepita: 1; Patamar: 10; Amplitude: 66.	57
Figura 28 - Variograma direcional (157,5/0) para os teores de TREO. Efeito pepita: 1; Patamar: 11; Amplitude: 52.	58
Figura 29 - Variograma vertical (0/90) para os teores de TREO ajustado no modelo esférico. Efeito pepita: 4; Patamar: 10 e; Amplitude:9.	58
Figura 30 - Histograma dos teores de TREO (%) para a população com outliers substituídos pelo valor da média + duas vezes o desvio padrão (A) e com exclusão dos outliers (valores maiores do que média + 2 vezes o desvio padrão) (B).	59
Figura 31 - Variograma omnidirecional para os teores de TREO com substituição dos outliers ajustado no modelo esférico. Efeito pepita: 6; Patamar: 8 e; Amplitude:60.	61
Figura 32 - Variograma direcional (22,5/0) para os teores de TREO com substituição dos outliers ajustado no modelo esférico. Efeito pepita: 2; Patamar: 6; Amplitude: 51.	61
Figura 33 - Variograma direcional (157,5/0) para os teores de TREO com substituição dos outliers ajustado no modelo esférico. Efeito pepita: 2; Patamar: 8; Amplitude: 42.	62
Figura 34 - Variograma vertical (0/90) para os teores de TREO com substituição dos outliers ajustado no modelo esférico. Efeito pepita: 3,2; Patamar: 7,7 e; Amplitude: 21.	62
Figura 35 - Variograma omnidirecional para os teores de TREO com exclusão dos outliers ajustado no modelo esférico. Efeito pepita: 4,2; Patamar: 5,3 e; Amplitude:17	63
Figura 36 - Esquema exemplificando um modelo de blocos.	65
Figura 37 - Relação entre a caixa limite do modelo de blocos com o modelo tridimensional do depósito. O eixo Y indica o Norte.	66
Figura 38 - Vista em planta na cota 1050 m mostrando as subcélulas criadas mantendo o contato geológico das unidades definidas para o depósito.	67
Figura 39 - Modelo de blocos exibindo o resultado da krigagem ordinária para os teores de TREO. O eixo Y indica o Norte.	68
Figura 40 - Seção E-W (Seção 1) comparando o modelo geológico com o modelo de blocos com os teores de TREO estimados por krigagem ordinária.	69
Figura 41 - Histograma dos teores de TREO (%) para os blocos estimados por krigagem ordinária.	71
Figura 42 - Curva de parametrização para o Depósito Área Zero.	72

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Informações da planilha <i>collar</i>	39
Quadro 2 – Informações da planilha <i>assay</i>	40
Quadro 3 - Informações da planilha <i>survey</i>	40
Quadro 4 – Informações da planilha <i>geology</i>	41
Quadro 5 - Informações da planilha <i>density</i>	41
Quadro 6 - Informações da planilha <i>topography</i>	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estatísticas descritivas para os valores de comprimento (em metros) das amostras dos testemunhos de sondagem.....	51
Tabela 2 - Estatísticas descritivas para os valores de TREO entre as amostras originais e as regularizadas.....	51
Tabela 3 -Estatísticas descritivas para os valores de TREO para as amostras regularizadas, encontrados nas unidades presentes no depósito.....	53
Tabela 4 - Dados de densidade em g/cm ³ para os litotipos presentes no depósito.....	55
Tabela 5 - Parâmetros para o cálculo dos variogramas omnidirecionais para a variável TREO.	56
Tabela 6 - Parâmetros para o cálculo dos variogramas direcionais para as os teores de TREO.	57
Tabela 7 - Estatísticas descritivas para os valores de TREO, para as amostras com outliers substituídos e outliers excluídos da população.....	60
Tabela 8 - Tabela comparativa entre as propriedades dos variogramas entre as amostras regularizadas e as com substituição dos outliers.	64
Tabela 9 - Dados utilizados para a construção do modelo de blocos.....	65
Tabela 10 - Recursos estimados para o Depósito de Terras Raras Área Zero.....	69
Tabela 11 – Comparação entre os dados estatísticos para teores de TREO das amostras originais regularizadas e blocos estimados por krigagem ordinária.....	70

SUMÁRIO

1.	Introdução	12
2.	Objetivos.....	14
3.	Revisão Bibliográfica	15
3.1.	Análise Estatística.....	15
3.1.1.	Distribuição de frequências	15
3.1.2.	Média	17
3.1.3.	Mediana e Moda	18
3.1.4.	Variância.....	18
3.1.5.	Desvio padrão	19
3.1.6.	Coeficiente de variação.....	19
3.2.	Composição Ponderada das Amostras (<i>Compositing</i>).....	19
3.3.	<i>Outliers</i>	20
3.4.	Análise Geoestatística.....	20
3.4.1.	Variograma	21
3.4.2.	Krigagem	27
4.	Área de Estudos	30
4.1.	Localização	30
4.2.	Aspectos Fisiográficos.....	31
4.3.	Geologia Regional	31
4.4.	Geologia Local.....	34
4.4.1.	Unidades do depósito.....	35
4.4.2.	Mineralização	37
5.	Dados utilizados	39
6.	Modelo Tridimensional (3D).....	43
7.	Análise Exploratória dos Dados	50
7.1.	Regularização das amostras.....	50
7.2.	Amostras não diferenciadas por unidade.....	51
7.3.	Análise das amostras diferenciadas por unidade	53
7.4.	Densidade	55
8.	Modelagem Geoestatística.....	56
8.1.	Análise Variográfica.....	56
8.1.1.	População com substituição dos <i>outliers</i>	60
8.1.2.	População com exclusão dos <i>outliers</i>	63

9.	Avaliação de Recursos.....	65
9.1.	Quantificação de Recursos	66
9.2.	Validação da Krigagem	70
9.3.	Curva tonelagem x teor.....	71
10.	Conclusões.....	73
	Referências	75

1. Introdução

Os elementos terras raras (ETR) constituem um grupo de 17 elementos químicos, sendo 15 elementos da série dos lantanídeos: Lantânio (La), Cério (Ce), Praseodímio (Pr), Neodímio (Nd), Promécio (Pm), Samário (Sm), Európio (Eu), Gadolínio (Gd), Térbio (Tb), Disprósio (Dy), Hólmio (Hm), Érbio (Er), Túlio (Tm), Itérbio (Yb) e Lutécio (Lu), somados ao Escândio (Sc) e Ítrio (Y) por apresentarem propriedades físico-químicas semelhantes (VONCKEN, 2016).

Os ETR podem ser divididos em leves (La, Ce, Pr, Nd, Pm e Sm) e pesados (Gd, Tb, Dy, Hm, Er, Tm, Yb e Lu). O Y insere-se nos pesados, já o Eu pode ser incluído nos dois grupos, mesmo apresentando características distintas dos outros ETR. Os ETR são elementos estratégicos que possuem amplo uso na indústria de alta tecnologia e, apesar de ocorrerem numa variedade de espécies minerais, sua concentração em depósitos economicamente exploráveis não é comumente encontrada.

Atualmente a China detém cerca de 40% das reservas de terras raras do mundo, sendo responsável por 85% da indústria extrativa e produção destes metais (ORTIZ; VIANA JÚNIOR, 2014), conseqüentemente tornando-se a maior detentora dos ETR. Visando uma maior independência com relação aos ETR, vários países estão intensificando a viabilização de projetos para exploração desses elementos, incluindo o Brasil.

Nesse contexto, encontra-se o depósito “Área Zero”, localizado no município de Araxá, MG. Esse depósito possui sua mineralização conhecida desde a década de 60, porém os trabalhos de pesquisa se intensificaram em 2011 quando a empresa MbAC Fertilizantes iniciou um processo intensivo de sondagem para quantificar os recursos e viabilizar a exploração dos mesmos.

O uso de ferramentas geoestatísticas para análises quantitativas de recursos minerais tem sido amplamente utilizado nos últimos anos. O avanço dessa ciência possibilitou um maior entendimento dos depósitos minerais, sendo utilizada para prever o comportamento de variáveis de interesse em locais ainda não amostrados. Desse modo, a geoestatística vem sendo utilizada a fim de reduzir as incertezas nas modelagens, aumentando o nível de conhecimento geológico com teores e valores de tonelagem próximo ao real, permitindo assim, a viabilização do empreendimento mineiro.

Com base nos aspectos acima descritos, essa dissertação se pautará na avaliação e aplicabilidade do método geoestatístico de krigagem ordinária, para a estimativa de recursos do depósito de terras raras “Área Zero”.

2. Objetivos

O objetivo geral do presente trabalho é a modelagem geoestatística através de Krigagem Ordinária de um depósito de elementos terras raras.

Como objetivo secundário, temos a construção de um modelo geológico tridimensional (3D) com o intuito verificar a interação entre a mineralização e a forma de distribuição lateral das unidades presentes no depósito.

3. Revisão Bibliográfica

3.1. Análise Estatística

A estatística é uma ferramenta de análise exploratória e preliminar dos dados, baseando no pressuposto que as variáveis são aleatórias ou independentes, ou seja, não variam com a localização. Essa análise tem como objetivo caracterizar e descrever estatisticamente as distribuições dos dados visando o melhor entendimento do comportamento das variáveis de interesse dentro do depósito (YAMAMOTO; BETTENCOURT; MONTANHEIRO, 2001).

Com essa técnica, pretende-se conhecer a distribuição de frequências (histograma), as medidas de tendência central (média, mediana e moda) e a dispersão dos valores em torno da média (variância, desvio padrão e coeficiente de variação).

3.1.1. Distribuição de frequências

A distribuição de frequências é o arranjo de dados, classificados pela sua respectiva frequência em categorias de valores (classes). Descreve a forma como as populações de amostras estão distribuídas dentro do intervalo amostrado. A representação gráfica dessas classes é chamada de histograma (Figura 1). Para a construção da distribuição de frequências deve-se determinar o número de intervalo de classes.

Uma regra empírica e bastante utilizada é a estabelecida por Sturges (1926):

$$K = 1 + 3,3 \log_{10} n$$

K representa o número de intervalo de classes e n o número de valores.

Para a avaliação de recursos, duas distribuições de frequências são importantes, a distribuição normal e lognormal.

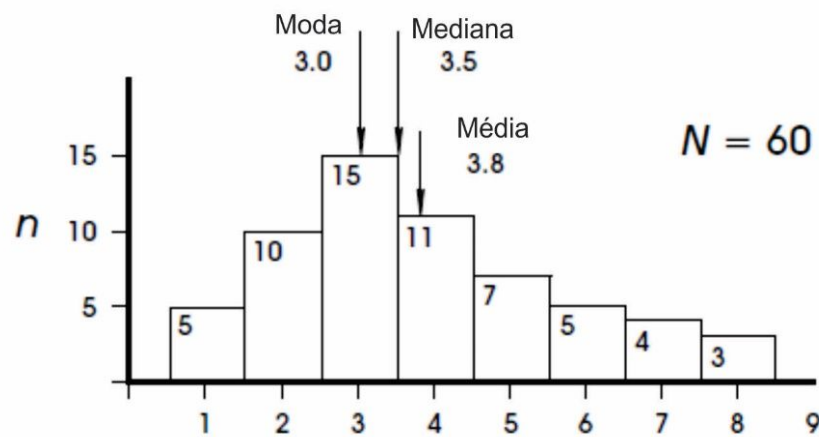


Figura 1 - Histograma de dados hipotéticos mostrando a posição da moda, mediana e média em um conjunto de dados. Os números de dados de cada classe estão indicados no interior das barras (SINCLAIR; BLACKWELL, 2004).

3.1.1.1. Distribuição Normal ou Gaussiana

A distribuição normal ou gaussiana tem sua função de densidade de probabilidade expressa por:

$$f(X) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-1/2\left[\frac{X-\mu}{\sigma}\right]^2}$$

$f(X)$ representa a função de densidade de probabilidade;

X representa uma variável aleatória;

μ representa a posição central da distribuição (média) e;

σ representa a dispersão da distribuição (desvio padrão).

A Figura 2 (A) exibe uma curva normal típica e a Figura 2 (B) apresenta os gráficos da função densidade de probabilidade com as áreas que são amplamente difundidas.

3.1.1.2. Distribuição Lognormal

A distribuição lognormal (Figura 3) caracteriza-se por uma distribuição com assimetria positiva, cujo logaritmo dos valores observados tendem a uma distribuição normal.

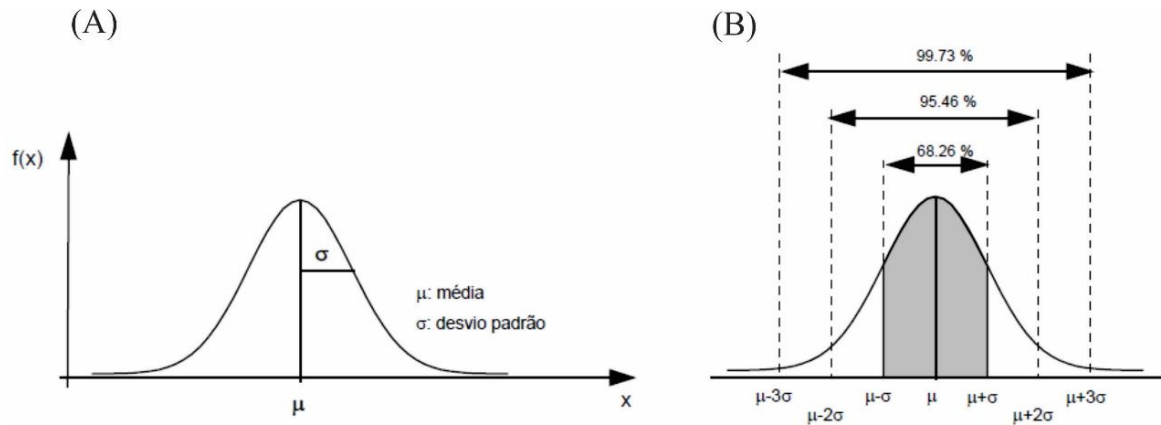


Figura 2 - Exemplo de curva de distribuição normal típica (A). Gráficos da função densidade de probabilidade da distribuição normal (B) (CORREA, 2003).

Essa distribuição é amplamente encontrada na fase de avaliação de recursos minerais, principalmente em depósitos de metais raros, com muitos valores baixos e poucos valores altos (YAMAMOTO; BETTENCOURT; MONTANHEIRO, 2001).

A função densidade de probabilidade da distribuição lognormal é definida pela seguinte equação:

$$f(X) = \frac{1}{X\beta\sqrt{2\pi}} e^{-1/2\left[\frac{\log X - \alpha}{\beta}\right]^2}$$

α representa a média dos logaritmos de X e;

β representa o desvio padrão dos logaritmos de X em relação a α .

Para a interpretação de dados que seguem essa distribuição, deve-se inicialmente realizar uma transformação não-linear (logarítmica) nos dados para que a distribuição se aproxime da distribuição normal.

3.1.2. Média

A média ou esperança matemática é representada por $\bar{X}$, calculada pela fórmula:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}$$

X_i representa cada uma das observações disponíveis na amostra e i varia de 1 até n observações.

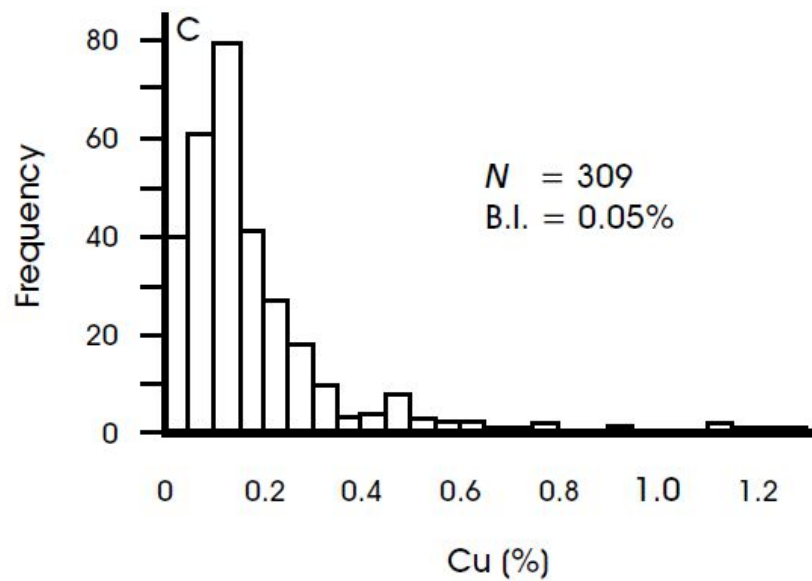


Figura 3 - Exemplo de distribuição lognormal para dados percentuais de cobre (Cu). N representa o número de amostras e B.I. o intervalo de classe. (SINCLAIR; BLACKWELL, 2004).

3.1.3. Mediana e Moda

A mediana divide um conjunto de dados em duas partes iguais. Caso haja número ímpar de dados, a mediana será o próprio valor central e, se a quantidade de dados for par, a mediana será a média aritmética dos dois valores centrais.

A moda é o valor mais frequente observado em uma amostra. Porém, em um conjunto de dados, pode não haver uma moda ou pode existir: distribuição unimodal (uma moda), distribuição bimodal (duas modas) ou distribuição polimodal (três ou mais modas).

3.1.4. Variância

A variância é representada por S^2 e indica a dispersão dos valores em torno da média, podendo ser calculada através da fórmula:

$$S^2 = Var[X] = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}$$

X_i representa o valor de cada observação na amostra.

3.1.5. Desvio padrão

O desvio padrão S equivale à raiz quadrada positiva da variância:

$$S = \sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 / n - 1}$$

3.1.6. Coeficiente de variação

O coeficiente de variação (CV) é o resultado da divisão do desvio padrão pela média aritmética, como pode ser observado na fórmula a seguir:

$$CV = \frac{S}{\bar{X}}$$

Trata-se de uma medida adimensional que permite a comparação da dispersão relativa de variáveis com diferentes distribuições (YAMAMOTO; BETTENCOURT; MONTANHEIRO, 2001).

3.2. Composição Ponderada das Amostras (*Compositing*)

As amostras oriundas dos testemunhos de sondagem, utilizados para a avaliação de recursos, nem sempre apresentam a mesma espessura. Por vezes, a amostragem é realizada respeitando os contatos litológicos e, assim, algumas amostras podem apresentar valores menores ou maiores dos previamente estabelecidos.

Para que ocorra a homogeneização dos dados é necessário que ocorra a ponderação dos intervalos amostrados, associando a espessura da amostra com os teores de determinado elemento químico.

O resultado da composição de amostras pode ser expresso pela seguinte equação (YAMAMOTO; ROCHA, 2001):

$$t_c = \frac{\sum_{i=1}^n t_i e_i}{\sum_{i=1}^n e_i}$$

t_c representa o trecho compositado;

n representa o número de trechos para compor o intervalo de trabalho;

t_i representa o teor do i -ésimo trecho e;
 e_i representa a espessura do i -ésimo trecho.

3.3. *Outliers*

Outliers são valores inconsistentes em relação à distribuição da maioria dos dados. São comumente encontrados em depósitos de metais raros e, de acordo com Sinclair e Blackwell (2004), podem causar problemas na avaliação de recursos:

- (i) Introdução de variabilidade nas estimativas dos parâmetros estatísticos;
- (ii) Um *outlier* que se encontra próximo à porção central de um bloco estimado, pode causar aumento do teor do mesmo, ocasionando uma superestimação.

Para contornar esse problema algumas técnicas podem ser adotadas, a fim de minimizar a interferência dos *outliers*:

- (i) Durante a modelagem do variograma, os *outliers* podem ser excluídos e posteriormente reinseridos na base de dados para o procedimento de krigagem (SINCLAIR; BLACKWELL, 2004);
- (ii) Rossi e Deutsch (2014) definem um intervalo entre ± 2 ou ± 3 desvios padrão em relação à média ou mediana para diminuir a influência dos *outliers*. Os valores que ultrapassam esse intervalo podem ser desconsiderados ou o valor máximo considerado deve ser adotado.
- (iii) Os valores discrepantes não podem ser totalmente ignorados, visto que os mesmos podem pertencer à uma população de alto teor dentro do depósito.

3.4. Análise Geoestatística

A geoestatística, como ciência, tem sua criação datada do ano de 1951 quando o engenheiro de minas Daniel Krige, trabalhando com dados de concentração de ouro em minas do Rand, na África do Sul, concluiu que a informação gerada pela análise da variância seria insuficiente para explicar o fenômeno estudado. Krige passou então a considerar a distância entre as observações, ou seja, a localização e a dependência espacial das amostras. Baseado em trabalhos empíricos de Krige, o geólogo e matemático Georges Matheron (1963, 1971) desenvolveu a “teoria das variáveis regionalizadas”.

Uma variável regionalizada é uma função $f(x)$ do ponto x , que varia de um ponto a outro com continuidade aparente, porém que não pode ser representado por uma função matemática simples (determinística). Matheron foi o primeiro a utilizar o termo “geoestatística”.

De acordo com Burrough (1987) a teoria das variáveis regionalizadas pode ser expressa pela soma de três componentes:

- (i) Uma componente estrutural associada a um valor médio constante ou a uma tendência constante;
- (ii) Uma componente aleatória, espacialmente correlacionada e;
- (iii) Um ruído aleatório ou erro residual (diferentes tipos de anisotropia).

Segundo Yamamoto (2001), a teoria das variáveis regionalizadas tem por objetivo o estudo e a representação das propriedades estruturais das variáveis regionalizadas para a resolução de problemas de estimativa.

3.4.1. Variograma

O variograma é uma função crescente da distância h e indica o quão diferentes os valores se tornam à medida que a distância aumenta. Cada valor amostral possui uma forte interferência nos valores da vizinhança, definindo a continuidade espacial (ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989). Em termos práticos, esta é a ferramenta matemática que permite estudar a dispersão natural das variáveis regionalizadas (GUERRA, 1988).

Já em termos matemáticos, a função variograma $2\gamma(h)$ é a esperança matemática do quadrado dos acréscimos da variável regionalizada em estudo de uma determinada direção ou o valor médio do quadrado das diferenças entre todos os pares de pontos presentes na área estudada, tomados a uma distância h uns dos outros e não depende dos pontos de apoio e sim do espaçamento entre eles (ANDRIOTTI, 2005).

A função variograma pode ser escrita como:

$$2\gamma(h) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [Z(x+h) - Z(x)]^2$$

n representa o número de pares de pontos separados por uma distância h ;

$Z(x)$ representa o valor da variável regionalizada no ponto x ; e

$Z(x + h)$ representa o valor da regionalizada no ponto $x + h$.

Porém para descrever quantitativamente a variância utiliza-se a função semivariograma $\gamma(h)$ que é metade da função variograma $2\gamma(h)$, evidenciada na equação abaixo:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n [Z(x + h) - Z(x)]^2$$

Na literatura, comumente a função semivariograma é tratada como variograma (SINCLAIR; BLACKWELL, 2004), assim como nesse trabalho. A função semivariograma pode ser expressa em termos da variância e covariância, conforme equação abaixo:

$$\gamma(h) = C(0) - C(h)$$

$C(0)$ representa a variância e $C(h)$ a covariância.

A função variograma é representada graficamente pelo variograma (Figura 4). O estudo dos variogramas possibilita obter os parâmetros que descrevem o comportamento espacial das variáveis regionalizadas.

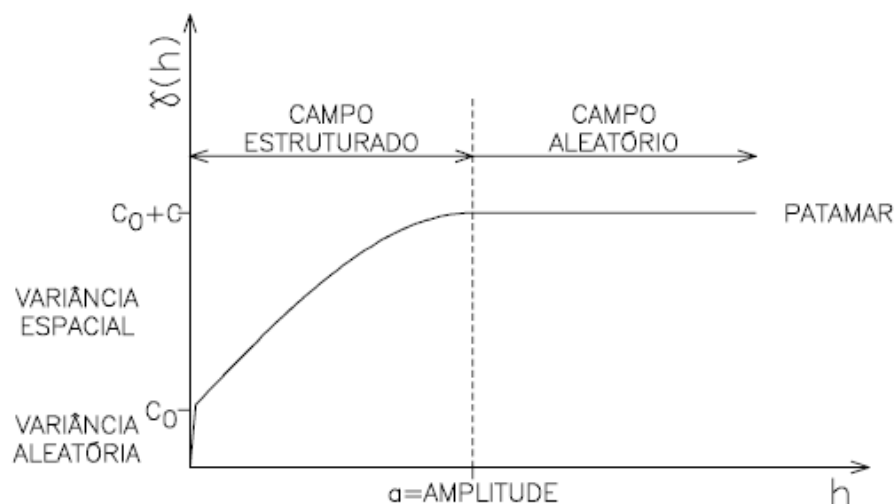


Figura 4 - Variograma típico e suas propriedades (YAMAMOTO, 2001).

3.4.1.1. Propriedades dos variogramas

As principais propriedades dos variogramas, de acordo com Yamamoto (2001), são: amplitude, patamar, efeito pepita e variância espacial.

A **Amplitude** (*range*) a é a distância a partir da qual as amostras passam a ser independentes, ou seja, a partir da qual a variação média entre duas observações não é mais função da distância entre elas. A amplitude separa o campo estruturado (amostras correlacionadas) do campo aleatório (amostras independentes). Quanto maior o valor da amplitude, mais homogêneo será o fenômeno estudado.

O **Patamar** (*sill*) $C_0 + C$ é valor da variância na qual o variograma se estabiliza.

O **Efeito Pepita** (*nugget effect*) C_0 é o valor da função variograma na origem ($h = 0$). Teoricamente esse valor deveria ser zero, já que duas amostras tomadas no mesmo ponto ($h = 0$) deveriam apresentar os mesmos valores. O efeito pepita é correlacionável a problemas durante a amostragem, analíticos ou à variabilidade natural do depósito. Yamamoto (2001) refere-se ao efeito pepita como **Variância Aleatória**.

A **Variância Espacial** é definida como a diferença entre o patamar e o efeito pepita.

3.4.1.2. Comportamento próximo à origem

De acordo com Sarma (2009) quatro tipos de comportamento do variograma próximo à origem podem ser identificados (Figura 5):

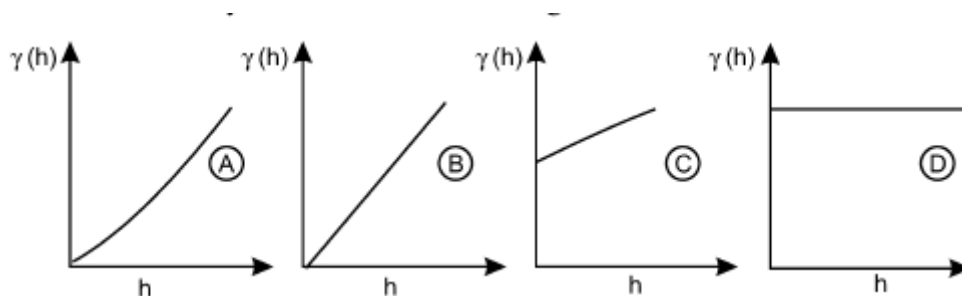


Figura 5 - Comportamento do variograma próximo à origem. (A) Altamente contínuo ou parabólico; (B) Contínuo ou linear; (C) Descontínuo ou Efeito Pepita e; (D) Aleatório ou Efeito Pepita Puro (SARMA, 2009).

O comportamento parabólico (Figura 5 A) indica que a variável regionalizada é altamente contínua. Já o comportamento linear (Figura 5 B) indica que a variável regionalizada também é contínua, porém menos do que aquela com comportamento parabólico.

O comportamento efeito pepita (Figura 5 C) revela uma descontinuidade próxima à origem, podendo ser causada por erros de amostragem ou variabilidade do depósito em pequenas distâncias.

A Figura 5 D exibe o comportamento definido como efeito pepita puro. Esse comportamento representa aleatoriedade, ou seja, as variáveis regionalizadas $Z(x + h)$ e $Z(x)$ não se correlacionam, independente dos valores de h . Esse caso demonstra uma falta de estruturação do variograma.

3.4.1.3. Anisotropia

Quando se calcula o variograma para todos os pares de pontos em determinadas direções como Norte-Sul, Leste-Oeste, etc., o semivariograma pode mostrar diferentes tipos de comportamento, significando que há a presença de anisotropia (Figura 6). Se essa diferença não for constatada, o variograma depende apenas da distância entre os pontos h e é chamado de isotrópico (SARMA, 2009).

Segundo Yamamoto (2001) a anisotropia pode ser geométrica (Figura 6 A), quando a amplitude varia conforme as direções, mas sob um patamar constante. Anisotropia zonal (Figura 6 B) quando a amplitude permanece constante e o patamar varia de acordo com a direção e, por último, anisotropia mista (Figura 6 C) em que variam tanto a amplitude quanto o patamar.

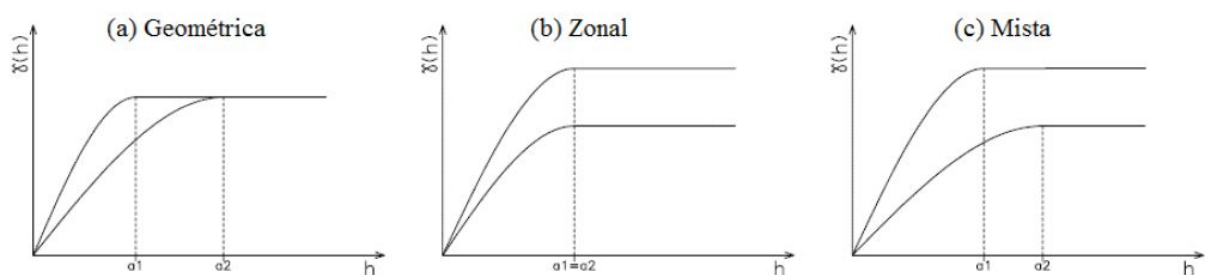


Figura 6 - Anisotropia Geométrica (A), Zonal (B) e Mista (C) (YAMAMOTO, 2001).

3.4.1.4. Cálculo de variogramas experimentais

O cálculo de variogramas experimentais (Figura 7) pode ser realizado ao longo de uma linha, um plano ou em três dimensões e alguns passos devem ser seguidos:

- (i) Definir o **número** e em quais **direções** os variogramas experimentais serão confeccionados;
- (ii) O **tamanho do passo** será a distância entre amostras que será considerada para o cálculo;
- (iii) O número de vezes que o passo será incrementado (**número de passos**).

Caso a malha de amostragem não seja regular, alguns outros métodos devem ser seguidos:

- (iv) Definir a **tolerância angular**, ou seja, o ângulo de busca em que as amostras serão consideradas para a confecção do variograma; e
- (v) Estabelecer a porcentagem da distância do passo (**tolerância do passo**).

Algumas técnicas podem ser utilizadas para melhor ajustar os variogramas experimentais (SARMA, 2009):

- Observar se há pelo menos 50 pares de dados em cada passo;
- Se as amostras são oriundas de diferentes níveis do depósito, deve-se produzir um variograma para cada nível e depois definir um variograma médio.

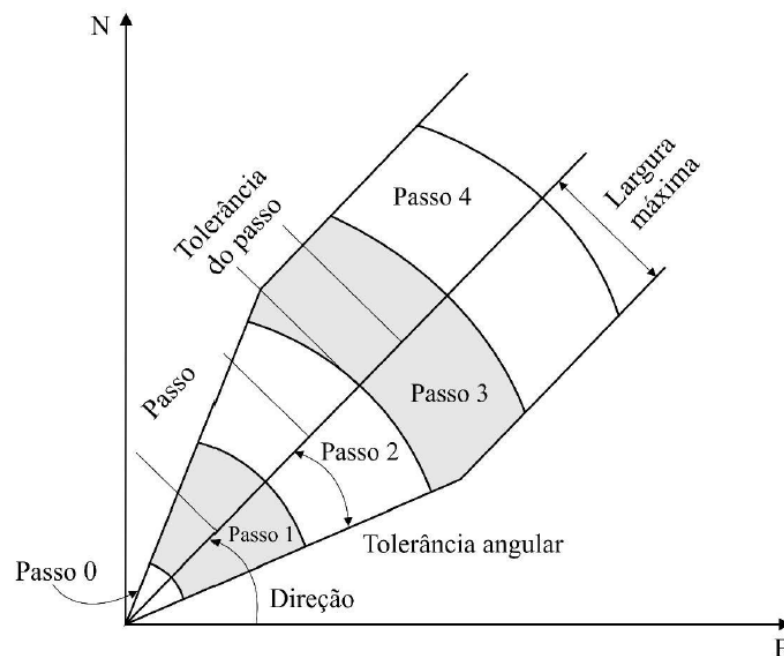


Figura 7 - Desenho esquemático mostrando como se define a direção do variograma, número de passos, tolerância angular, tolerância e largura máxima (YAMAMOTO, 2001).

3.4.1.5. Modelos de variogramas

Após a confecção do variograma de pontos, deve-se ajustar uma função matemática que descreva continuamente a variabilidade ou correlação espacial existente nos dados. Esse ajuste é conhecido como ajuste de modelos teóricos em geoestatística (YAMAMOTO, 2001).

De acordo com Sarma (2009) cinco modelos são comumente utilizados (Figura 8):

- Função Power - $\alpha|h|^p$ com $0 < p < 2$. Esse caso pode ser utilizado como existe um modelo linear $\gamma(h) = \alpha|h|$;
- Modelo Esférico - $\gamma(h) = C_0 + C \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right]$ para $h < a$
 $\gamma(h) = C_0 + C$ para $h \geq a$

O modelo esférico é o modelo mais utilizado;

- Modelo Exponencial - $\gamma(h) = C_0 + C \left[1 - \exp \left(- \left(\frac{h}{a} \right) \right) \right]$;
- Modelo Gaussiano - $\gamma(h) = C_0 + C \left[1 - \exp \left(- \left(\frac{h}{a} \right)^2 \right) \right]$;
- Modelo Cúbico - $\gamma(h) = C_0 + C \left[7 \left(\frac{h}{a} \right)^2 - \frac{35}{4} \left(\frac{h}{a} \right)^3 + \frac{7}{5} \left(\frac{h}{a} \right)^5 - \frac{3}{4} \left(\frac{h}{a} \right)^7 \right]$;

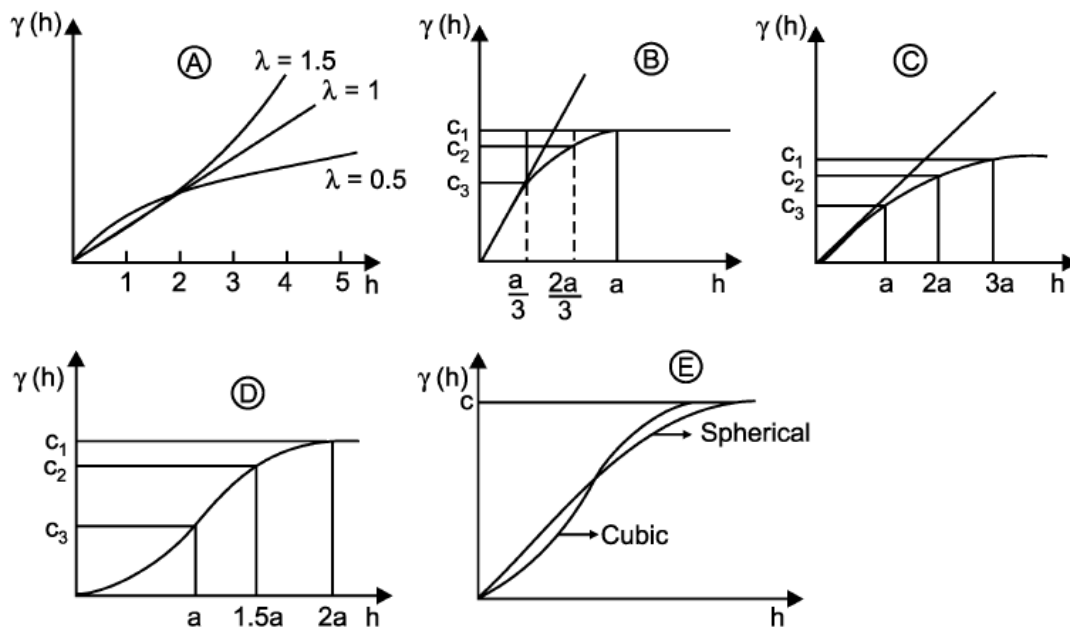


Figura 8 - Exemplos de modelos de variograma comumente utilizados: (A) Função Power; (B) Modelo Esférico; (C) Modelo Exponencial; (D) Modelo Gaussiano e (E) Modelo Cúbico (SARMA, 2009). O patamar indicado como C será chamado de C_0+C .

3.4.2. Krigagem

Conforme Sinclair e Blackweel (2004), krigagem é um termo genérico aplicado para uma variedade de métodos de estimativa (pontual ou bloco) que dependem da minimização de erro da estimativa. O termo foi criado por Matheron e Carlier em homenagem à Daniel Krige.

Landim e Sturaro (2002) definem que o método utiliza as informações do variograma para encontrar os pesos ótimos a serem associados às amostras conhecidas e assim, estimar os pontos desconhecidos. O método fornece, além da estimativa dos valores desconhecidos, o erro associado a essa estimativa, diferenciando-o dos demais algoritmos de interpolação. Ainda segundo os autores, a krigagem é entendida como uma série de técnicas de análise de regressão que procura minimizar a variância estimada a partir de um modelo prévio que leva em conta a dependência estocástica entre dados distribuídos no espaço.

A krigagem engloba um número de métodos de estimativa como: krigagem simples, krigagem ordinária, krigagem lognormal, krigagem indicadora, etc. Neste trabalho utilizou-se a técnica de krigagem ordinária, que é uma das formas mais usuais de estimativa.

Ressalta-se que a krigagem só deve ser utilizada quando o variograma experimental for estruturado, ou seja, se a variabilidade não for totalmente aleatória – efeito pepita puro (YAMAMOTO, 2001).

3.4.2.1. Krigagem Ordinária

Isaaks e Srivastava (1989) afirmam que a estimativa por krigagem é associada ao acrônimo B.L.U.E. (*best linear unbiased estimation*).

- *linear* porque a estimativa é uma combinação linear das amostras vizinhas;
- *unbiased* (não viciada) porque busca o resíduo médio ou valor do erro de estimativa igual a zero e;
- *best* porque minimiza a variância de estimativa dos erros.

De acordo com Yamamoto (2001), a krigagem é um método que permite estimar o valor desconhecido $Z^*(x_0)$ associado a um ponto, área ou volume a partir de um conjunto n de dados $\{Z(x_i), i = 1, n\}$ disponíveis.

O estimador da krigagem ordinária $Z^*_{KO}(x_0)$ pode ser obtido através da seguinte equação:

$$Z^*_{KO}(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i)$$

λ_i representam os pesos associados ao valor medido na posição x_i .

Os ponderadores ($\lambda_i, i = 1, \dots, n$) são obtidos através da resolução de um sistema de equações lineares chamado de Equações de Krigagem. Journel e Huijbregts (1978) estipulam que os ponderadores são calculados sob duas condições de restrição:

- que o estimador não seja enviesado, ou seja, tendencioso e;
- que a variância de estimativa seja mínima.

O não viés da estimativa é obtido quando o erro (diferença entre valor real e valor calculado) é igual a zero:

$$E[Z^*_{KO}(X_0) - Z(X_0)] = 0$$

Desenvolvendo a expressão da esperança do erro, define-se a condição de não viés:

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$$

A variância da estimativa ou variância do erro de estimativa pode ser expressa de acordo com a seguinte equação:

$$\sigma_E^2 = Var[Z(x_0) - Z^*_{KO}(x_0)]$$

A minimização da variância da estimativa, sujeita à condição de não enviesamento, resulta no sistema de equações de krigagem ordinária:

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j C(x_i - x_j) - \mu = C(x_i - x_0) \text{ para } i = 1, n$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1$$

As equações também podem ser representadas em forma matricial:

$$\begin{bmatrix} C(x_1 - x_1) & C(x_1 - x_2) & \dots & C(x_1 - x_n) & 1 \\ C(x_2 - x_1) & C(x_2 - x_2) & \dots & C(x_2 - x_n) & 1 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots \\ C(x_n - x_1) & C(x_n - x_2) & \dots & C(x_n - x_n) & 1 \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_n \\ -\mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C(x_0 - x_1) \\ C(x_0 - x_2) \\ \vdots \\ C(x_0 - x_n) \\ 1 \end{bmatrix}$$

$C(x_n - x_n)$ representa a variância espacial entre amostras;

$C(x_0 - x_n)$ representa a variância espacial entre amostras e ponto estimado e;

μ representa o multiplicador de Lagrange utilizado para obter a variância mínima sob a condição $\sum \lambda_i = 1$.

4. Área de Estudos

4.1. Localização

O Depósito Área Zero está localizado no município de Araxá, inserido na macrorregião do Alto Paranaíba e mesorregião do Triângulo Mineiro do Estado de Minas Gerais (Figura 9). Dista 370 km da capital mineira (Belo Horizonte) e 590 km de São Paulo.

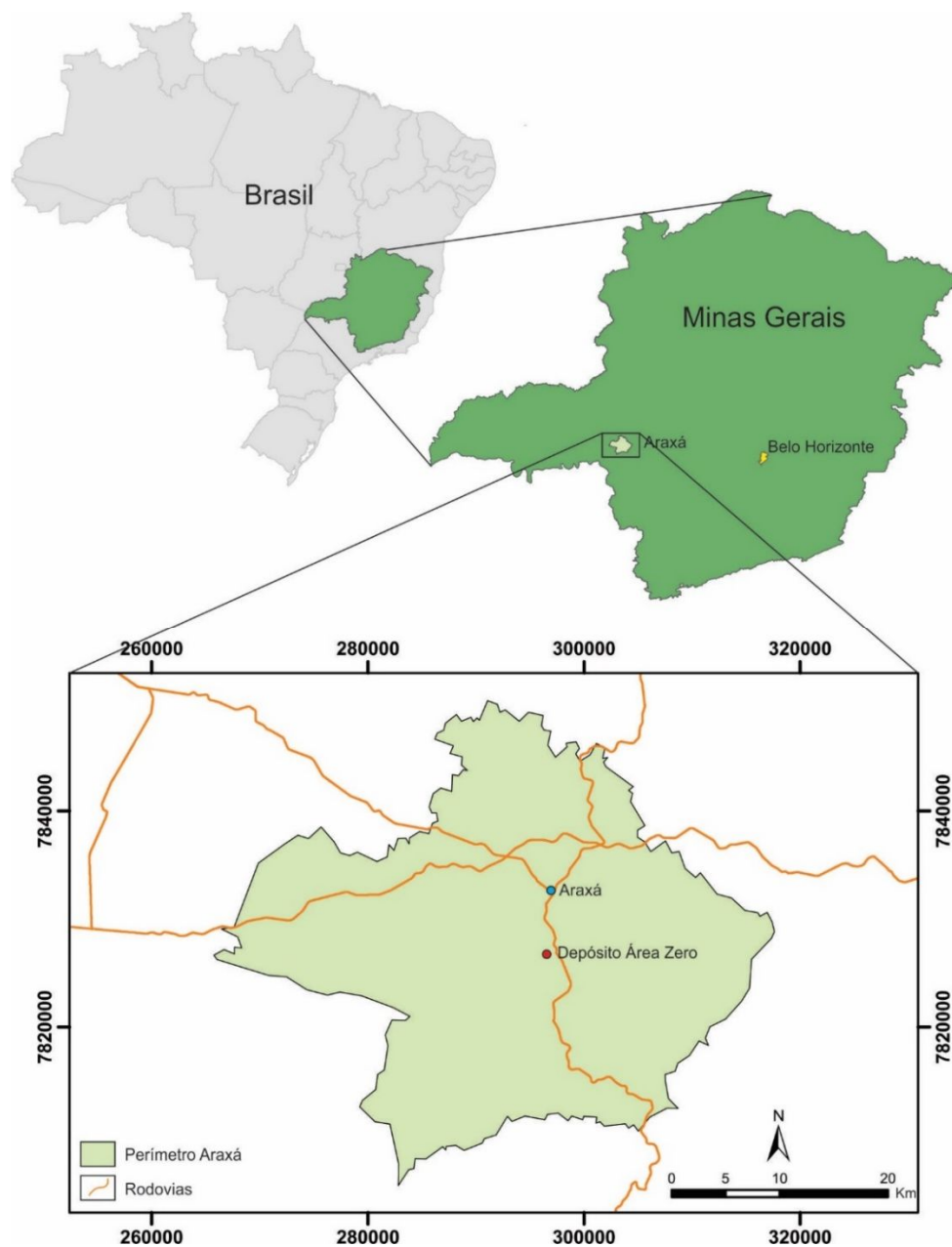


Figura 9 - Mapa de localização do município de Araxá em território Nacional e a posição do depósito em relação à área urbana do município.

4.2. Aspectos Fisiográficos

O clima do município de Araxá é caracterizado como Aw de Köppen, podendo ocorrer o clima Cwa, em áreas de clima mais ameno, caracterizando-se por inverno seco e verão chuvoso (RIBEIRO; WALTER, 1998). As temperaturas médias situam-se entre 20°C e 22°C e a umidade relativa média é de 75,6%.

A área do município diversifica-se com relação às formas de relevo, devido às condições morfoestruturais e morfoesculturais. Valeriano et al. (2004) inserem o município em uma Unidade Morfoestrutural do tipo faixa de dobramento (Faixa Brasília). De acordo com Rocha e Rosa (2009), 66,17% da área do município possui declividade variando entre 5 a 20% (relevo suave a ondulado); 25,2% da área possui declividade inferior a 5% (relevo plano) e os 8,63% restantes possuem uma declividade maior do que 20% (relevo fortemente ondulado – montanhoso).

O solo predominante consiste em uma associação entre latossolo vermelho distrófico (textura muito argilosa) + latossolo vermelho-amarelo distroférico (textura argilosa) (MOTTA et al., 2004). A vegetação original da região é de campos-cerrados, porém grande parte do município apresenta vegetação modificada, dominada por pastagens, que representam 88% desse total.

Araxá pertence à Bacia Hidrográfica do Rio Araguari, que possui uma área de aproximadamente 21.856 km² no Estado de Minas Gerais. Os rios e córregos da região apresentam inúmeras cachoeiras e corredeiras. A altitude máxima é de 1450 m (Serra da Bocaína) e a mínima é de 910 m (Rio Capivara).

4.3. Geologia Regional

O depósito Área Zero situa-se na porção sul da Faixa Brasília, na Província Ígnea do Alto Paranaíba (Figura 10), inserido no Complexo Alcalino-Carbonatítico Araxá, também conhecido como Complexo Alcalino-Carbonatítico do Barreiro (TRAVERSA et al., 2001), um dos mais importantes complexos alcalino-carbonatíticos do mundo. Nele se hospeda a maior reserva mundial de nióbio.

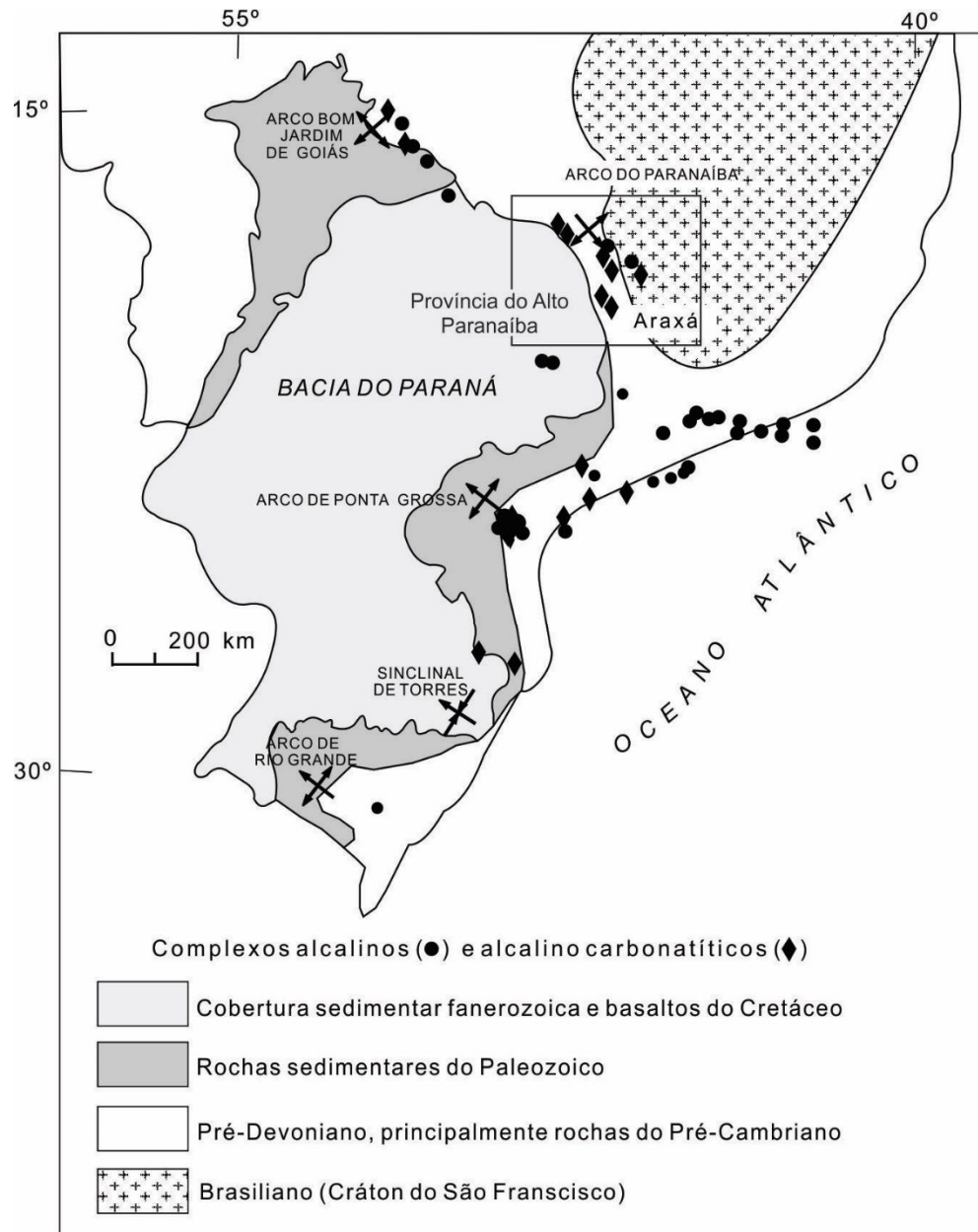


Figura 10 - Ocorrências de rochas alcalinas e alcalino-carbonatíticas na porção Sul do Brasil. A Província Ígnea do Alto Paranaíba está destacada. (Modificado de TRAVERSA et al., 2001).

O complexo é uma intrusão circular, com aproximadamente 4,5 km de diâmetro e 16 km² de área. As rochas encaixantes são xistos e quartzitos do Grupo Ibiá (Figura 11) deformados em estrutura dômica (SEER, 1999). O complexo é constituído por carbonatitos, sustentando o núcleo, e por uma complexa rede de diques concêntricos e radiais, assim como pequenos veios com espessura variando de milimétrica a centimétrica. Os veios e diques estão presentes tanto no complexo alcalino quanto nas rochas hospedeiras.

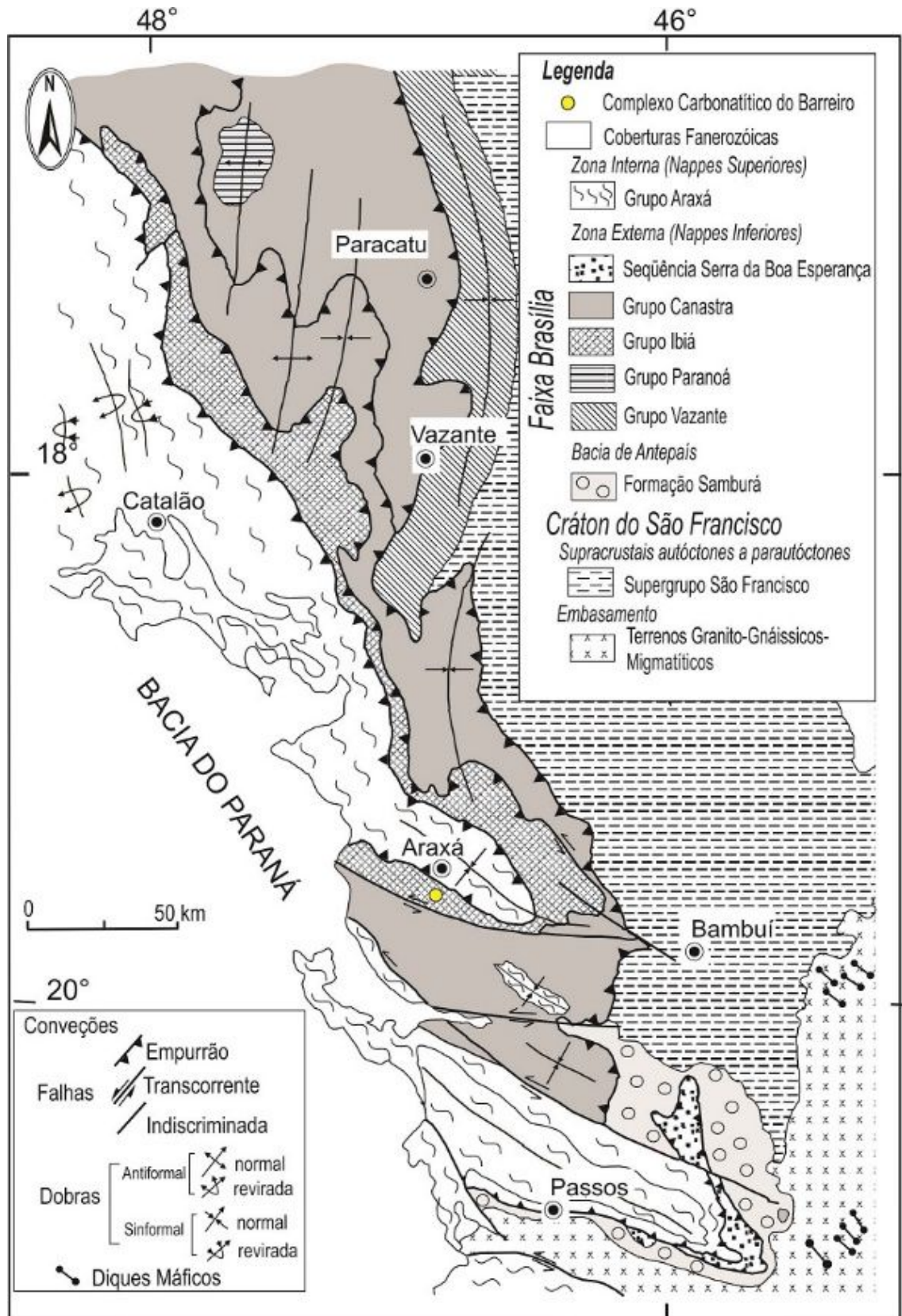


Figura 11 - Localização do Complexo Alcalino-Carbonatítico do Barreiro na Porção Sul da Faixa Brasília (Modificado de SILVA et al., 2006).

Segundo Issa Filho et al. (1984) existe um halo de fenitização que atinge até 2,5 km de distância a partir do contato do carbonatito com a encaixante, resultando na formação de arfvedsonita, calcita, feldspato alcalino, piroxênio sódico e apatita nos quartzitos (especialmente nas fraturas). Gibson et al. (1995) concluíram que a atividade magmática alcalina ocorreu entre 80 e 90 Ma. As idades foram geradas a partir de análise de rochas e minerais através dos métodos K/Ar, Ar/Ar e U/Pb.

O centro do complexo é composto por beforsitos e glimeritos, com sovitos subordinados. O núcleo é circundado por glimeritos com beforsitos associados. Ocorre uma zona de flogopitito metassomático entre o núcleo carbonatítico e a encaixante, como pode ser verificado na Figura 12. Silva (1986) expressa que ao contrário dos outros complexos presentes na Província, o tipo de carbonatito predominante é o dolomítico, com sovitos (calcita carbonatitos) ocorrendo apenas na porção NW da intrusão.

A erosão e o intemperismo dessas rochas alcalinas criaram um espesso perfil de alteração (atingindo até 230 m), gerando uma concentração residual de determinados minerais e consequentemente o enriquecimento em nióbio, fosfato e ETR, dependendo da composição química predominante na rocha fonte.

4.4. Geologia Local

A área de estudos encontra-se na porção norte do complexo, em uma área de 400 m x 200 m, com seu maior eixo orientado segundo a direção E-W (Figura 12).

De acordo com informações extraídas de 67 furos de sondagem diamantada, Waring et al. (2013) definiram um empilhamento estratigráfico local, dividida em três grupos principais: superficial, eluvial e rocha sã. O grupo superficial consiste nas unidades denominadas de solo, colúvio/alúvio, intervalo caulínítico e laterita. O grupo eluvial, também chamado de residual, é representado pela unidade saprolítica e por fim o terceiro grupo com apenas uma unidade, a rocha inalterada. A coluna estratigráfica local pode ser visualizada na Figura 13.

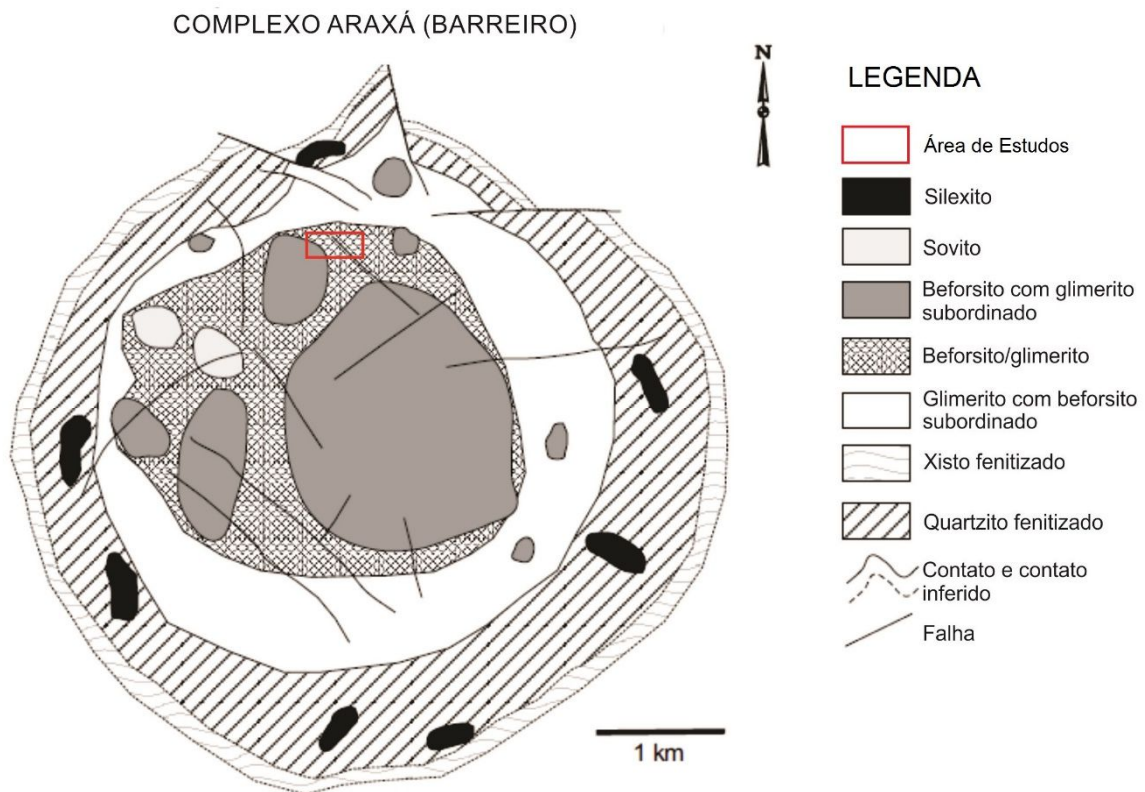


Figura 12 - Localização da área de estudos (depósito Área Zero) na interpretação geológica do Complexo Alcalino-Carbonatítico do Barreiro (Modificado de TRAVERSA et al., 2001).

4.4.1. Unidades do depósito

As unidades presentes no depósito, da base para o topo são: carbonatito (rocha inalterada), saprolito (carbonatito alterado), laterita e colúvio/alúvio (WARING et al., 2013).

4.4.1.1. Rocha inalterada (Carbonatito)

A rocha inalterada (apenas três furos de sondagem interceptaram essa unidade) apresenta coloração cinza e cinza esverdeado (Figura 13), com abundância de flogopita, além de estruturas e texturas diversas, sugerindo alteração hidrotermal. Carbonato dolomítico e pirita ocorrem como vênulas disseminadas na rocha.

4.4.1.2. Saprolito

A espessura dessa unidade varia entre 80 e 100 m. O saprolito é o carbonatito intensamente intemperizado, com as estruturas do protólito sendo reconhecidas apenas próximo ao contato com a rocha inalterada.

Porções silicificadas, ferruginosas (goethita) e manganíferas são encontradas. Zonas centimétricas com grãos sub-arredondados, fortemente fosfáticos são identificados nessa unidade, associado aos cristais de magnetita. Os sedimentos previamente descritos destacam-se do material saprolítico, com sua gênese atribuída a depósitos aluvionares desenvolvidos em drenagem subterrânea, gerado por lixiviação cárstica do carbonatito, em uma fase anterior à saprolitização. A Figura 13 exhibe essa unidade no testemunho de sondagem.

4.4.1.3. Laterita

A unidade laterítica (Figura 13) desenvolveu-se em ambiente superficial no topo da unidade saprolítica, e também pode ser encontrada intercalada com a unidade colúvio/alúvio. A espessura média é de 8,5 m.

Texturas primárias do carbonatito, assim como minerais contendo terras raras (monazita), podem ser identificados nessa unidade, assim como uma expressiva quantidade de óxido de manganês.

4.4.1.4. Colúvio/Alúvio

A unidade colúvio/alúvio possui aproximadamente 15 m de espessura. Sua gênese é atribuída ao material saprolítico, retrabalhado, transportado por gravidade e/ou corpo de água, com presença de sedimentos arenosos e argilosos oriundos das drenagens vizinhas.

Consiste em intervalos de coloração amarelo e marrom claro, com uma matriz fina e grãos de quartzo, com granulometria variando de fina a média. Localmente encontram-se partículas granulares de laterita (Figura 13).

Altos teores de ETR são atribuídos a essa unidade. Intervalos caulíníticos ocorrem intercalados nessa unidade (Figura 13) na forma de bolsões, apresentando até 12 m de espessura.

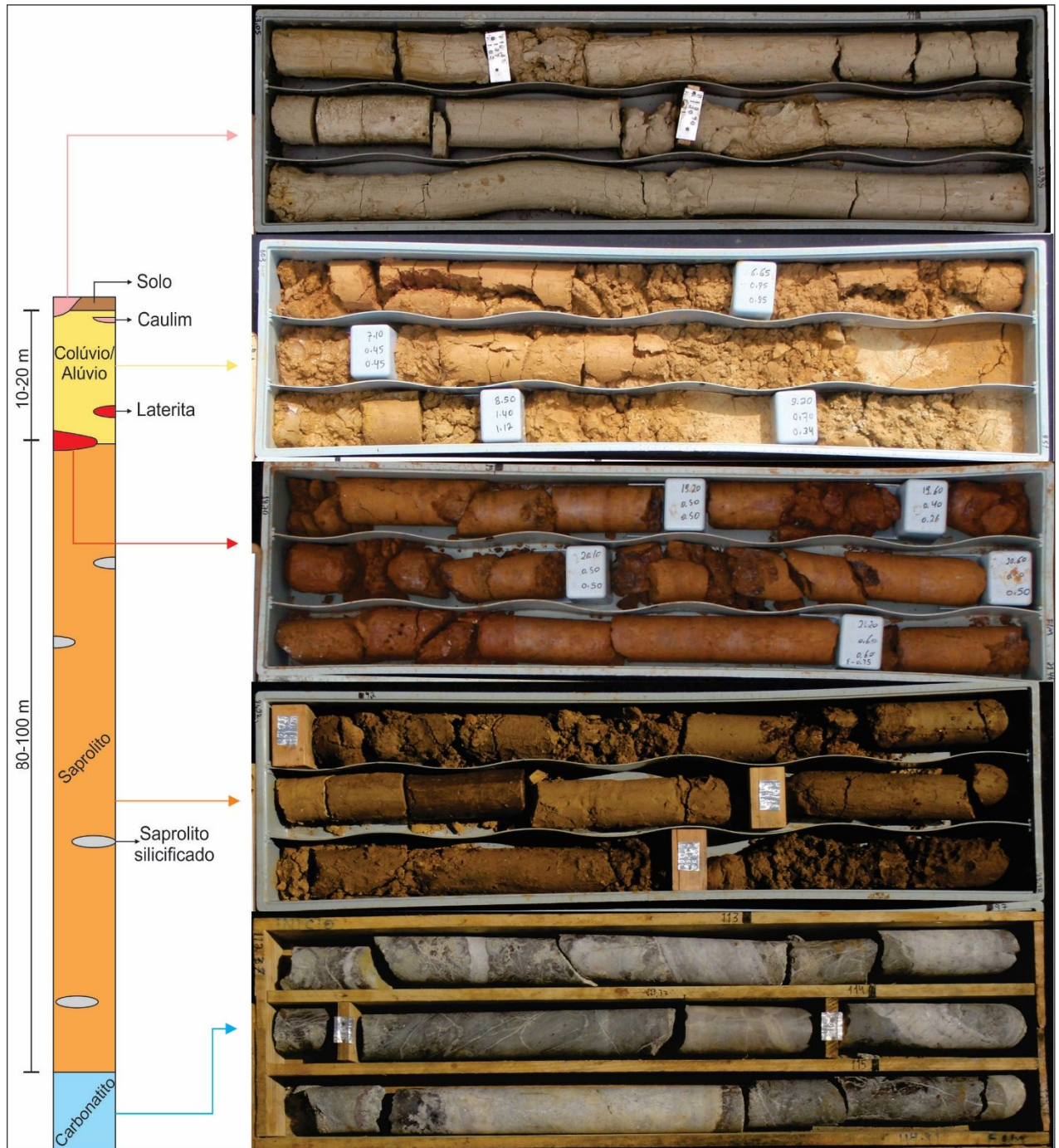


Figura 13 - Coluna estratigráfica esquemática evidenciando os litotipos encontrados na área do depósito a partir dos testemunhos de sondagem.

4.4.2. Mineralização

De acordo com Lapido-Loureiro e Santos (2013) a mineralização é resultado do enriquecimento supergênico de rochas carbonatíticas subjacentes, ricas em ETR. O corpo enriquecido em ETR caracteriza-se pela horizontalidade dos níveis mineralizados, intercalando

faixas mais ricas com outras mais pobres nesses elementos. A zona principal de enriquecimento situa-se entre a superfície e o nível freático.

4.4.2.1. Minerais de Minério

Os ETR encontram-se predominantemente na monazita (acima de 70%) e também numa solução sólida dos minerais do grupo da *plumbogummite*, onde gorceixita predomina e cerianita e bastnaesita ocorrem em porções inferiores a 1% (NEUMANN; MEDEIROS, 2015). Ainda segundo os autores supracitados, o nióbio (Nb) ocorre nos minerais do supergrupo do pirocloro e o fosfato (P_2O_5) atribuído à monazita bem como aos minerais do grupo da *plumbogummite*. Apatita ocorre em pequenas quantidades.

5. Dados utilizados

O presente trabalho foi desenvolvido utilizando dados fornecidos pela empresa MbAC Fertilizantes. A empresa perfurou, entre os anos de 2011 e 2012, 67 furos de sondagem diamantada, num total de 3764 metros, totalizando 3730 amostragens efetuadas. Desse total, 6 furos foram exploratórios, desta forma excluídos dessa pesquisa. A localização dos furos de sondagem utilizados nesse trabalho pode ser visualizada no mapa da Figura 14.

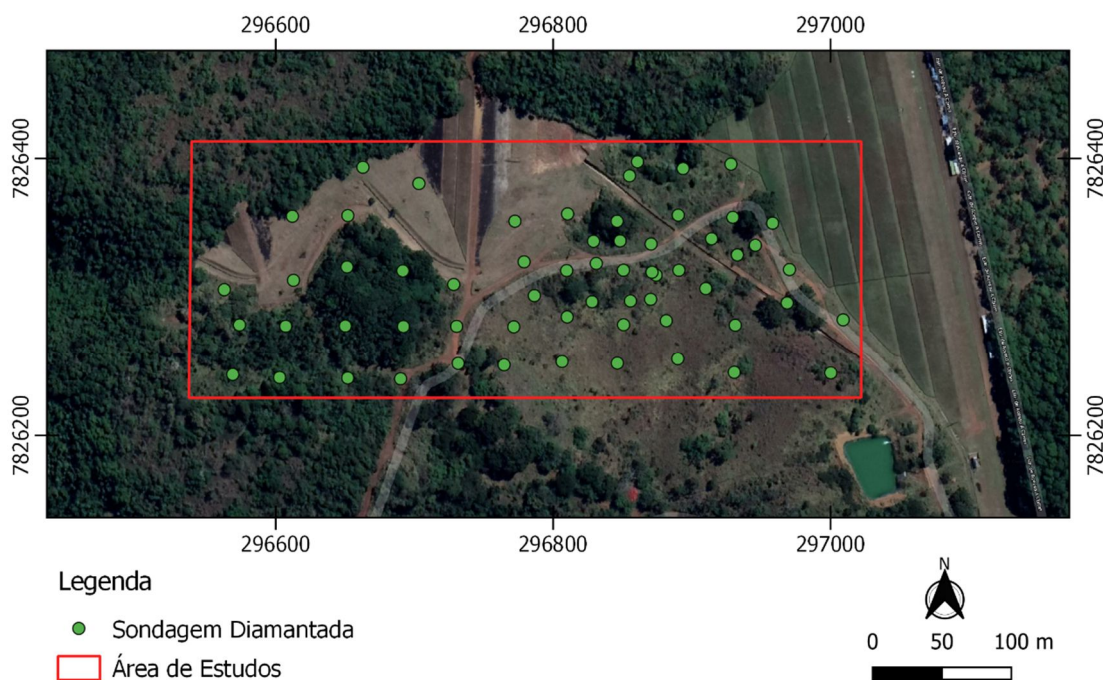


Figura 14 – Mapa com a localização dos furos de sondagem diamantada utilizados nesse trabalho, na área do depósito.

Os dados de sondagem e topografia foram fornecidos em formato *.csv com as seguintes informações:

- *Collar* (também chamado de boca do furo) – coordenadas Universal Transversa de Mercator (UTM) da localização do início do furo de sondagem. *Datum*: SAD 69 (Quadro 1);

Campo	Informação
BHID	Identificação do furo de sondagem (<i>borehole ID</i>)
XCOLLAR	Coordenada X do furo de sondagem
YCOLLAR	Coordenada Y do furo de sondagem
ZCOLLAR	Coordenada Z do furo de sondagem (cota topográfica)
EOH	Profundidade do furo de sondagem

Quadro 1 - Informações da planilha *collar*.

- *Assay* – informações sobre planos de amostragem e tamanho das amostras com os seguintes resultados analíticos (apresentados em porcentagem): TREO (*total of rare earth oxides* – total de óxidos de terras raras), P_2O_5 , Al_2O_3 , CaO , Fe_2O_3 , MgO , MnO_2 , Nb_2O_5 e SiO_2 , determinados por fluorescência de raios X e LOI (*loss on ignition* – perda ao fogo) (Quadro 2);

Campo	Informação
BHID	Identificação do furo de sondagem (<i>borehole ID</i>)
FROM	Profundidade inicial da coleta da amostra
TO	Profundidade final da coleta da amostra
LENGTH	Espessura da amostra coletada
TREO_PCT	Teor do <i>total of rare earth oxides</i> - Óxidos totais de terras raras em porcentagem. Não estão presentes os teores de Sc.
P2O5_PCT	Teor de P_2O_5 em porcentagem
AL2O3_PCT	Teor de Al_2O_3 em porcentagem
CAO_PCT	Teor de CaO em porcentagem
MGO_PCT	Teor de MgO em porcentagem
NB2O5_PCT	Teor de Nb_2O_5 em porcentagem
SIO2_PCT	Teor de SiO_2 em porcentagem
TIO2_PCT	Teor de TiO_2 em porcentagem
LOI_PCT	<i>Loss on ignition</i> - Perda ao fogo em porcentagem

Quadro 2 – Informações da planilha *assay*.

- *Survey* – direção e inclinação dos furos de sondagem. Todos os furos utilizados nesse trabalho são verticais (Quadro 3);

Campo	Informação
BHID	Identificação do furo de sondagem (<i>borehole ID</i>)
AT	Profundidade na qual a medição de inclinação foi realizada.
BRG	Direção, em graus, em relação ao Norte (sentido horário)
DIP	Ângulo de mergulho, em relação à horizontal, do furo de sondagem.
EOH	Profundidade do furo de sondagem

Quadro 3 - Informações da planilha *survey*.

- *Geology* – descrição geológica contendo os litotipos/sedimentos (solo, colúvio/alúvio, laterita, caulim, saprolito e carbonatito) presentes no depósito. Designa-se saprolito para a porção do carbonatito intensamente alterada e carbonatito para rocha inalterada (Quadro 4);

Campo	Informação
BHID	Identificação do furo de sondagem (<i>borehole ID</i>)
FROM	Profundidade inicial da ocorrência de determinado litotipo/sedimento
TO	Profundidade final da ocorrência de determinado litotipo/sedimento
ROCK	Indicação do litotipo/sedimento

Quadro 4 – Informações da planilha *geology*.

- *Density* – dados pontuais de densidade efetuada ao longo dos testemunhos de sondagem (Quadro 5) e;

Campo	Informação
BHID	Identificação do furo de sondagem (<i>borehole ID</i>)
FROM	Profundidade inicial da coleta da amostra para ensaio de densidade
TO	Profundidade final da coleta da amostra para ensaio de densidade
LENGTH	Espessura da amostra coletada
BD	Valor numérico da densidade da amostra

Quadro 5 - Informações da planilha *density*.

- *Topography* – arquivos de pontos contendo coordenadas X, Y, Z da área do depósito (Quadro 6).

Campo	Informação
XPT	Coordenada X do ponto levantado por estação total
YPT	Coordenada y do ponto levantado por estação total
ZPT	Coordenada Z do ponto levantado por estação total (cota topográfica)

Quadro 6 - Informações da planilha *topography*.

Os dados foram validados utilizando o *software* Leapfrog Geo[®]. O principal objetivo da validação de dados é verificar se há inconsistências no banco de dados e corrigi-las. As inconsistências presentes nas amostras utilizadas foram: presença de furo sem *collar*, sobreposição de intervalos amostrados, descrição geológica discordante dos intervalos amostrados, amostras sem análise química e furos sem descrição geológica.

Após a validação dos dados, construiu-se um modelo tridimensional (3D) do depósito para verificar a continuidade lateral dos litotipos/sedimentos presentes. O modelo 3D, as análises estatísticas, construção do modelo de blocos e krigagem ordinária foram desenvolvidos

no *software* Datamine[®]. Os variogramas experimentais e ajustes nos modelos teóricos foram confeccionados no *software* SGeMs.

6. Modelo Tridimensional (3D)

A construção do modelo foi iniciada com a geração da superfície topográfica através do arquivo XYZ. Como se tratava de um arquivo de pontos, utilizou-se o software Datamine® para interpolar os dados e criar a superfície que exhibe a morfologia do terreno. A Figura 15 exhibe o mapa gerado pelo *software* QGIS para os dados de topografia oriundos do Datamine®.

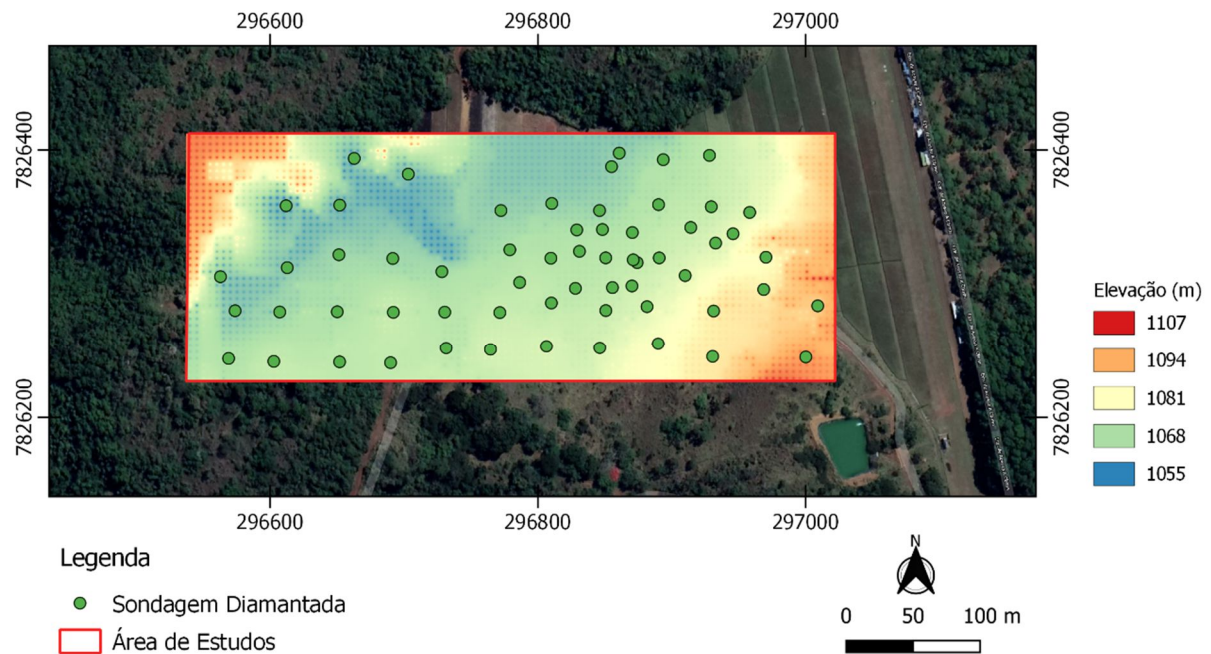


Figura 15 – Mapa de elevação do terreno para a área de estudos.

Em seguida, foram adicionados os dados de sondagem com os litotipos discriminados por cores, como pode ser visualizado na Figura 16.

Os dados de sondagem apresentam uma malha semirregular com espaçamento médio de 30 m. Baseado nessas informações, 7 seções com direção Leste-Oeste (E-W) foram definidas para a construção do modelo 3D (Figuras 17 e 18). As seções possuem espaçamento de 30 m entre elas, com exceção da primeira que possui espaçamento de 10 m. Para que nenhum furo de sondagem fosse excluído do modelo, foi adotado um corredor de busca de 15 m, tanto para norte quanto para sul, de forma a abranger a maior quantidade de informações.

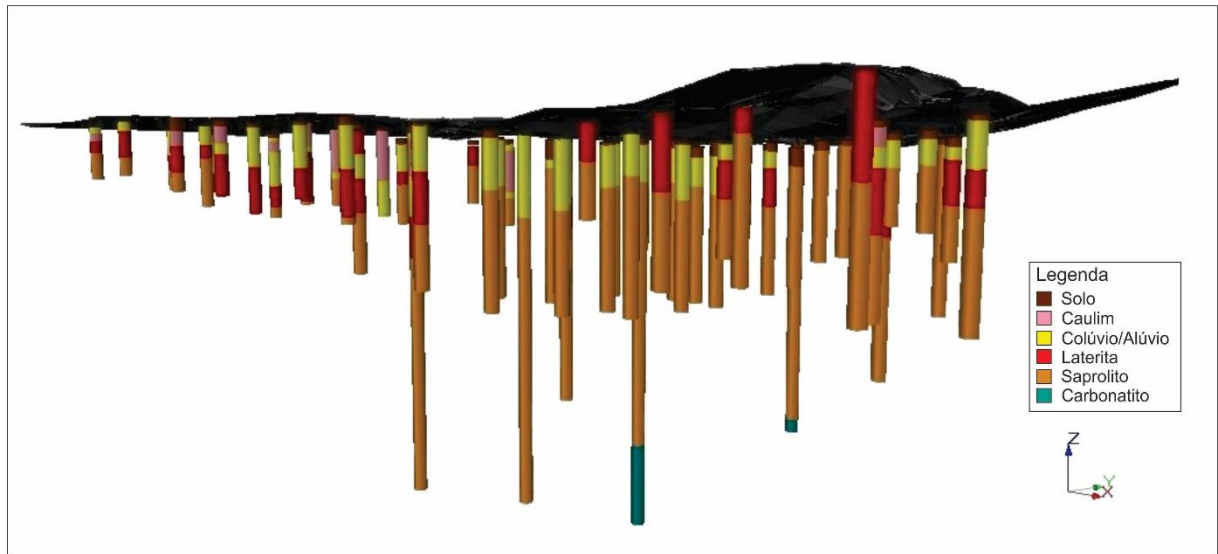


Figura 16 - Superfície topográfica da área de estudos com a posição espacial dos furos de sondagem utilizados para esse trabalho. O eixo Y indica o Norte.

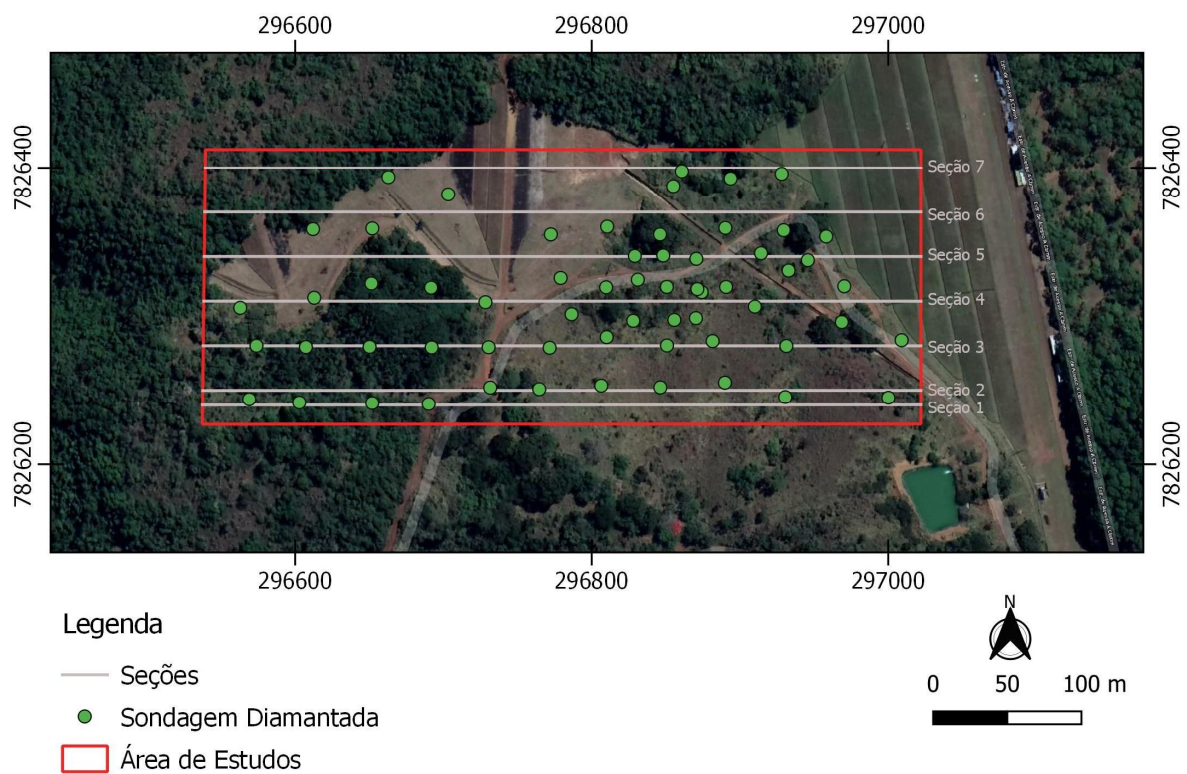


Figura 17 – Mapa da área de estudos com posição dos furos de sondagem e localização das seções.

Após a confecção e interpretação das 7 seções (4 seções podem ser visualizadas na Figura 19), com a correlação lateral entre as unidades presentes nos testemunhos de sondagens,

o modelo tridimensional do depósito foi finalizado (Figura 20). O carbonatito (rocha inalterada) não foi modelado e nem será utilizado para a quantificação de recursos por se encontrar em apenas dois furos de sondagem. O solo recobre a maioria da área de estudos, porém pequenas porções aflorantes de laterita, colúvio/alúvio e caulim são reconhecidas.



Figura 18 – Visão em perspectiva da localização das seções (linhas brancas) confeccionadas para a criação do modelo tridimensional do depósito. O eixo Y indica o Norte.

As seções apresentadas na Figura 20, demonstram a relação das unidades (litotipos e sedimentos) em profundidade. Assim como descrito no capítulo 4, a laterita ocorre no topo do saprolito, sendo recoberta pelo colúvio/alúvio. O caulim ocorre como um bolsão no interior da unidade colúvio/alúvio com porções aflorantes em superfície na porção sudoeste da área.

As Figuras 21 e 22 exibem cortes horizontais efetuados no modelo, corroborando as informações extraídas das seções geológicas, indicando uma calha de deposição (unidade colúvio/alúvio) na porção oeste, com provável contribuição de drenagem com fluxo de leste para oeste. Nota-se que o carbonatito alterado, demonstrado no modelo pelo saprolito, atinge cotas mais altas na porção leste, possivelmente servindo como uma das áreas fontes para os sedimentos retrabalhados e depositados de forma colúvio-aluvionar.

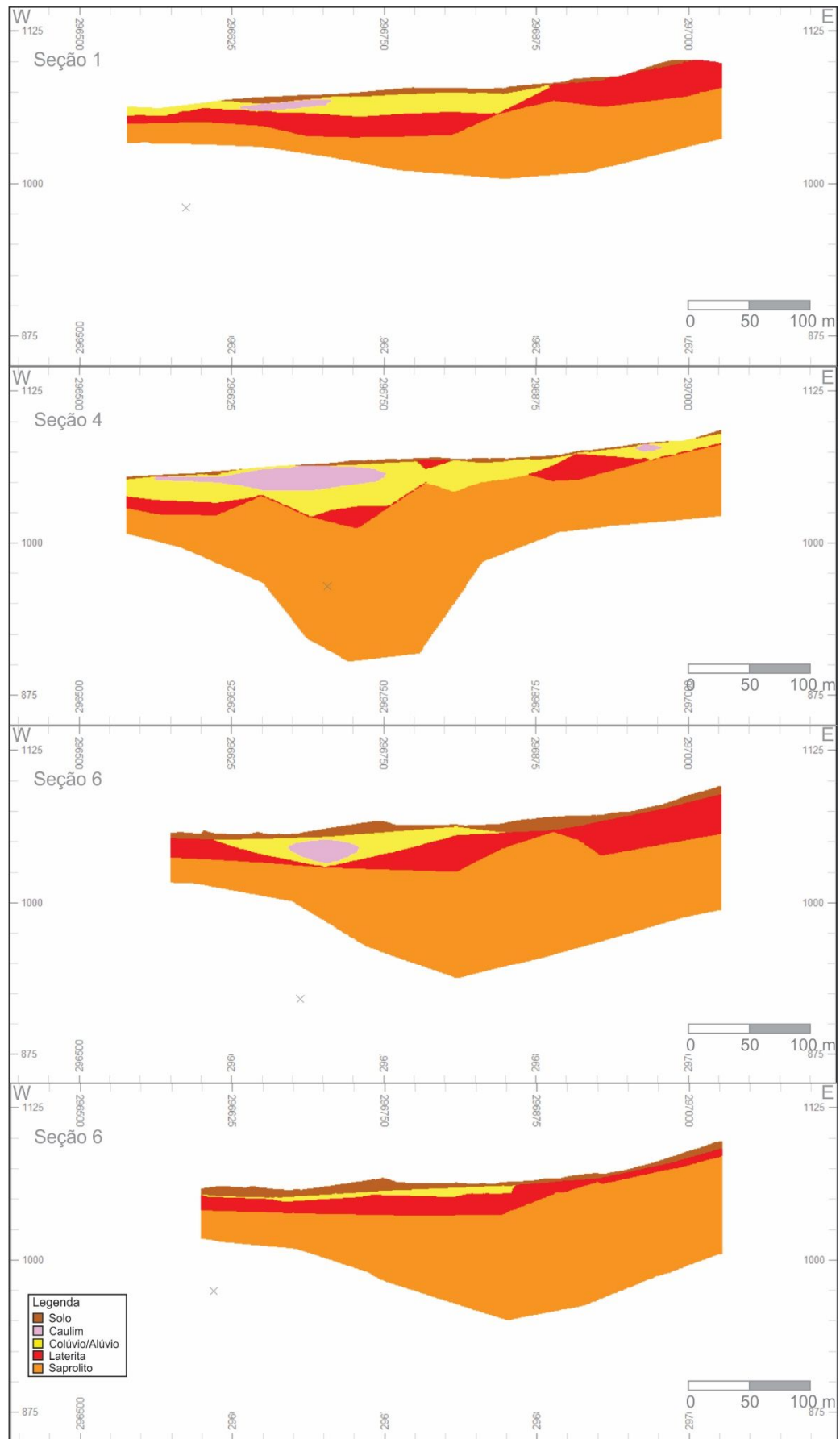


Figura 19 - Seções geológicas do Depósito Área Zero utilizadas para a confecção do modelo 3D.

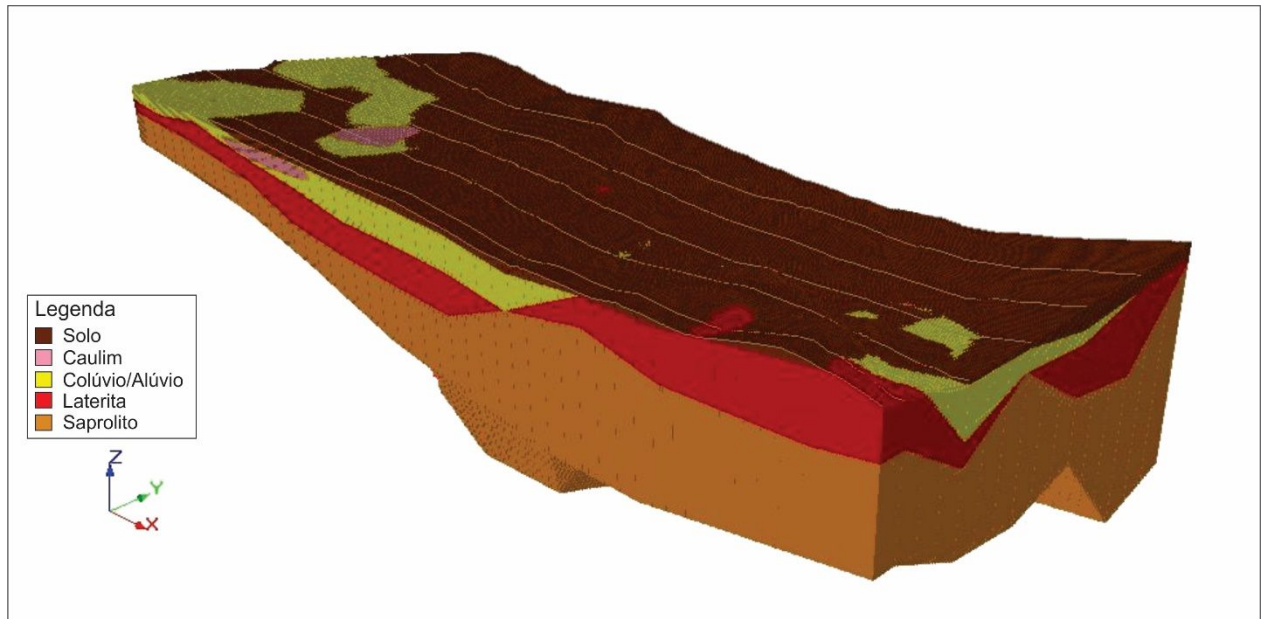


Figura 20 - Modelo tridimensional da área de estudos com a relação lateral entre as unidades presentes no depósito. O eixo Y indica o Norte.

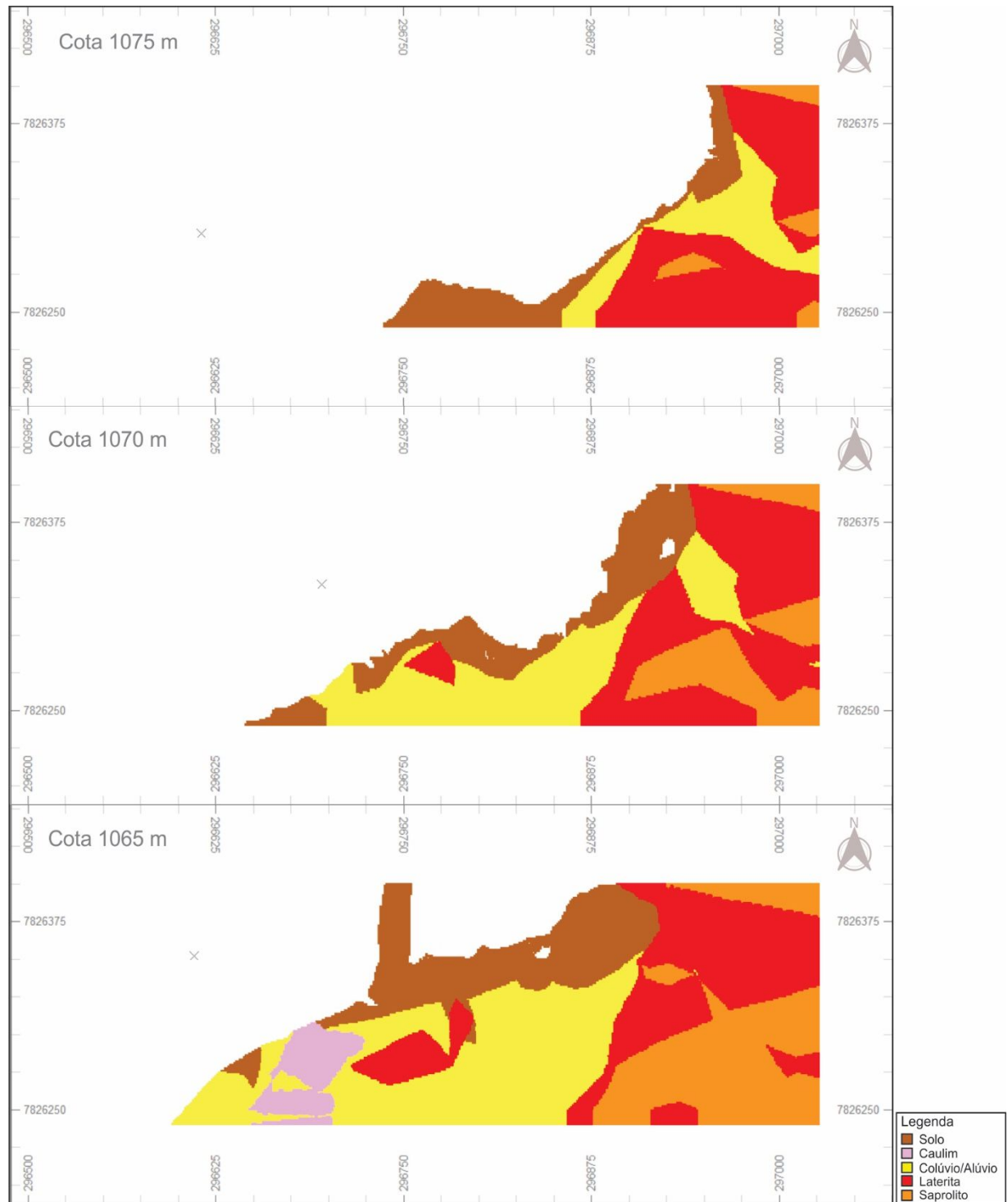


Figura 21 - Vista em planta de cortes no modelo geológico nas cotas: 1075 m, 1070 m e 1065 m.

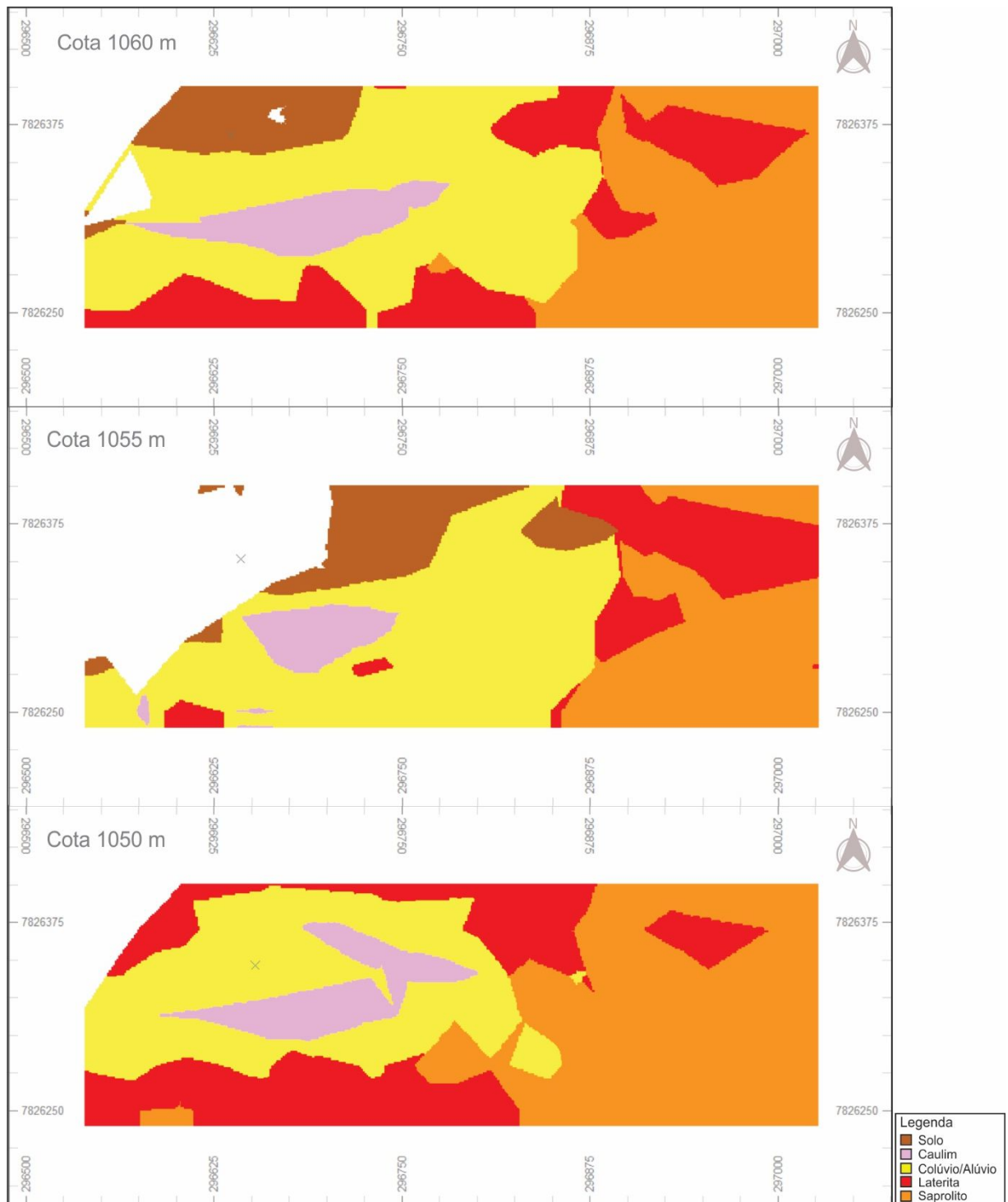


Figura 22 - Vista em planta de cortes no modelo geológico nas cotas: 1060 m, 1055 m e 1050 m.

7. Análise Exploratória dos Dados

7.1. Regularização das amostras

A regularização das amostras foi efetuada utilizando o *software* Datamine® com o objetivo de fazer com que todas as amostras possuíssem o mesmo suporte. Para isso, o método *down-the-hole* foi utilizado. Esse tipo de regularização inicia-se na porção superior do furo (superfície), buscando padronizar um tamanho fixo de amostra, em direção ao final do furo. Este processo utiliza as médias ponderadas dos teores das amostras divididas pelo comprimento. Desta forma, tentou-se regularizar as amostras em 1 m, desde que o contato entre as unidades fosse respeitado.

Antes da regularização, as amostras apresentavam tamanhos que variavam entre 0,1 m a 4,71 m (uma única amostra apresentou esse valor). Os histogramas das amostras originais e regularizadas podem ser visualizados na Figura 23.

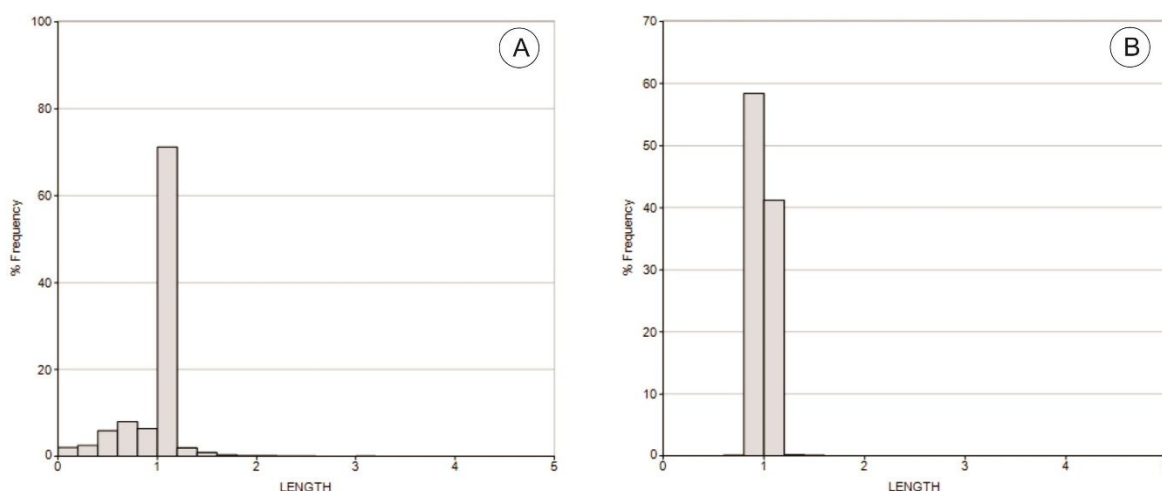


Figura 23 - Histograma da espessura das amostras antes da regularização (A) e após a regularização para 1 m (B).

Após a regularização, um total de 3282 amostras foram geradas (de um total de 3443), sendo que a média dos valores de espessura subiu de 0,93 m para 1,0 m e a variância consequentemente diminuiu, passando de 0,074 para 0,001. Os dados estatísticos podem ser visualizados na Tabela 1.

Tabela 1 - Estatísticas descritivas para os valores de comprimento (em metros) das amostras dos testemunhos de sondagem.

Estatística	Comprimento das amostras	
	Originais	Regularizadas
Número de amostras	3443	3282
Mínimo	0,100	0,750
Máximo	4,710	1,440
Média	0,930	1,000
Mediana	0,871	0,990
Primeiro Quartil	0,990	0,993
Terceiro Quartil	1,000	1,008
Variância	0,074	0,001
Desvio Padrão	0,273	0,031
Coeficiente de Variação	0,293	0,031

7.2. Amostras não diferenciadas por unidade

A análise estatística básica foi realizada para os teores de TREO em porcentagem, para as amostras originais e para as amostras regularizadas. Para esse cálculo, foram consideradas todas as amostras do depósito, sem distinção por unidades. O objetivo dessa análise foi avaliar a variância entre os grupos de dados e possíveis discrepâncias durante a regularização. O resultado pode ser visualizado na Tabela 2.

Tabela 2 - Estatísticas descritivas para os valores de TREO entre as amostras originais e as regularizadas.

Estatística	Amostras (% TREO)	
	Originais	Regularizadas
Número de amostras	3443	3282
Mínimo	0,021	0,381
Máximo	32,980	31,976
Média	5,063	5,072
Mediana	4,091	4,195
Primeiro Quartil	2,752	2,884
Terceiro Quartil	6,157	6,031
Variância	13,630	12,474
Desvio Padrão	3,692	3,532
Coeficiente de Variação	0,729	0,696

Como não há grande diferença entre os valores da média e da variância amostral, o processo de regularização das amostras foi adequado e não acarretará em erros na modelagem. Uma pequena suavização dos dados ocorreu entre as amostras originais e as regularizadas, determinada pela pequena diminuição na variância que reduziu de 13,630 para 12,474.

Prosseguindo com a análise exploratória dos dados, o histograma para as amostras regularizadas foi confeccionado. O diagrama de frequência para os teores de TREO pode ser visualizado na Figura 24.

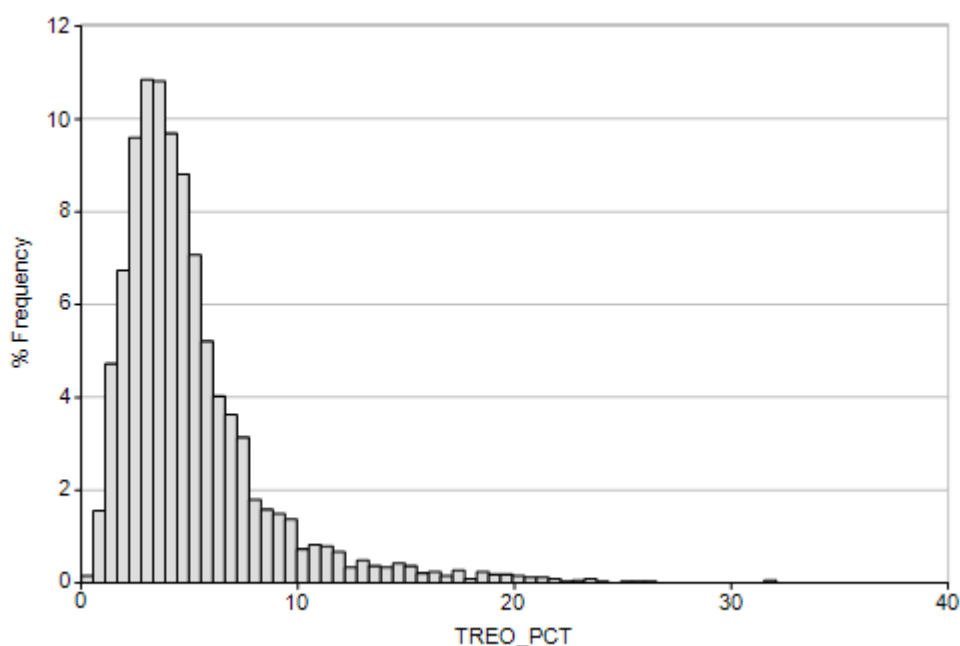


Figura 24 - Histograma dos teores de TREO (%) após a regularização das amostras.

O diagrama de frequências para os teores de TREO do depósito é unimodal, assimétrico positivo, mostrando que a maior frequência de teores se encontra abaixo de 6% (75% das amostras). O histograma é típico de uma distribuição lognormal, encontrado em depósitos de metais raros, em que há um maior número de amostras com teores baixos e poucas amostras com teores altos (YAMAMOTO; BETTENCOURT; MONTANHEIRO 2001).

A alta variabilidade dos teores de ETR dentro do depósito é constatada pelo valor da variância (12,474), mesmo suavizada após a regularização.

7.3. Análise das amostras diferenciadas por unidade

Seguindo a mesma metodologia adotada para as amostras não diferenciadas por unidade (litotipos e sedimentos do depósito), o cálculo estatístico para as unidades identificadas no depósito foi realizado e seu resultado pode ser visualizado na Tabela 3. Para identificar se os mesmos seguem um padrão de distribuição diferente do observado para as amostras do depósito (distribuição lognormal), foram confeccionados histogramas para cada unidade (Figura 25).

Tabela 3 -Estatísticas descritivas para os valores de TREO para as amostras regularizadas, encontrados nas unidades presentes no depósito.

Estatística	Amostras (% TREO)					
	Solo	Colúvio/ Alúvio	Intervalo Caulinítico	Laterita	Saprolito	Carbonatito
Número de amostras	117	564	130	514	1918	39
Mínimo	1,151	0,751	0,947	0,620	0,531	0,381
Máximo	14,128	31,976	25,109	23,743	26,301	5,232
Média	4,102	7,864	5,518	4,412	4,531	1,414
Mediana	3,775	6,56	4,046	3,624	3,961	1,171
Primeiro Quartil	2,884	4,447	1,788	2,399	2,875	0,777
Terceiro Quartil	4,677	10,116	7,599	5,317	5,465	1,618
Variância	3,421	23,985	20,001	9,973	6,990	0,966
Desvio Padrão	1,850	4,897	4,472	3,158	2,875	0,983
Coefficiente de Variação	0,451	0,623	0,811	0,716	0,584	0,695

A análise dos histogramas da Figura 25 permite constatar que os teores de TREO nas unidades se distribui configurando uma curva lognormal, com a maioria dos valores assumindo valores mais baixos e poucos assumindo valores altos. Os histogramas, assim como o gerado para o depósito, são unimodais e assimétricos positivos.

Todas as unidades estão mineralizadas para ETR com média de teores acima de 4%, com exceção do carbonatito, que apresenta teor médio de 1,414%. Os maiores valores são encontrados na unidade Colúvio/Alúvio com média de 7.864% e máximo de 31,976% de TREO. O menor valor de teor é atribuído à uma amostra de carbonatito com 0,381%.

As unidades solo e carbonatito possuem uma baixa variabilidade dos teores (variância de 3,421 e 0,966, respectivamente) em relação às unidades colúvio e intervalo caulínítico, com valores de variância de 23,985 e 20,001.

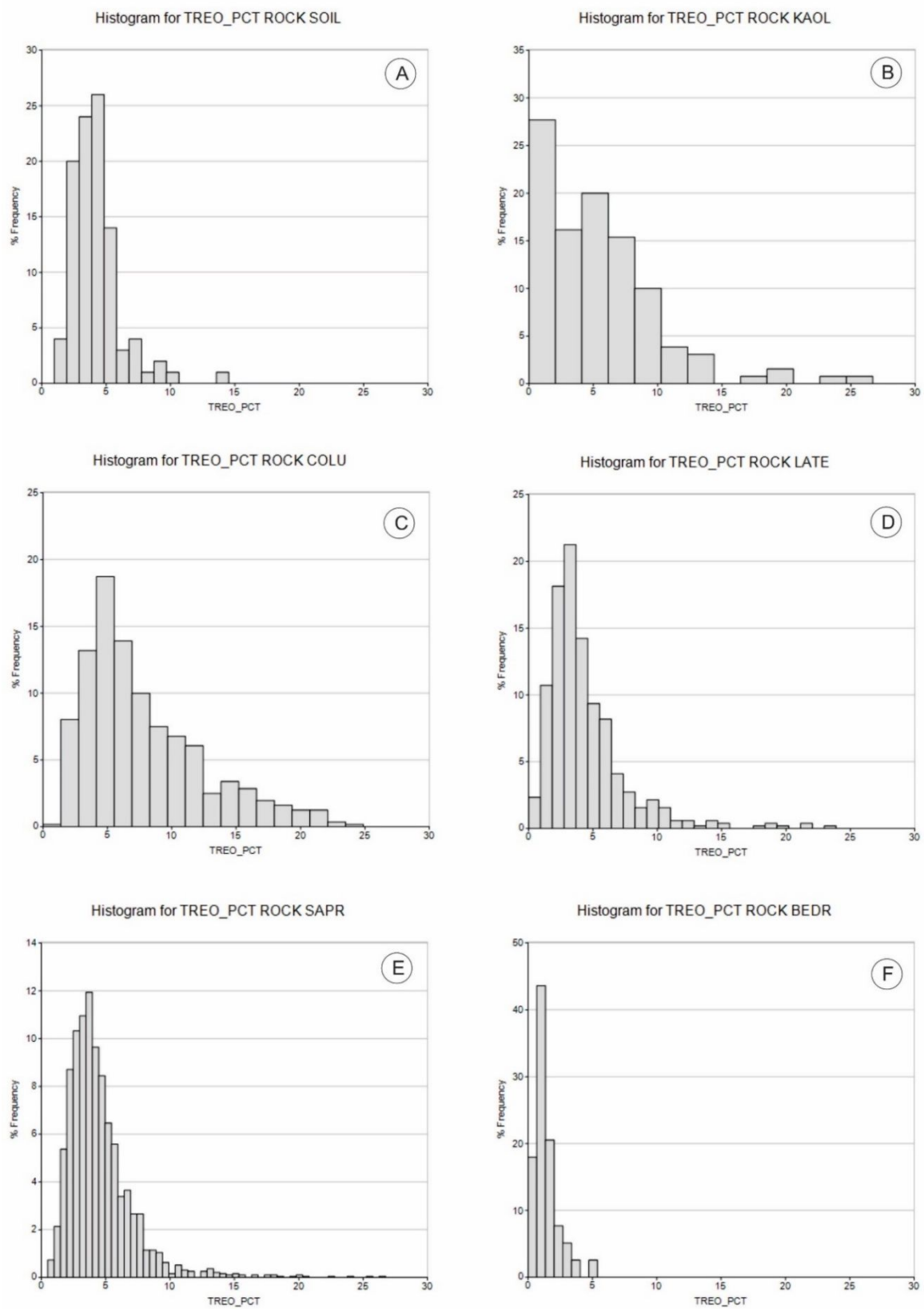


Figura 25 - Histograma dos teores de TREO (%) para as diferentes unidades: Solo (A), Intervalo Caulínico (B), Colúvio/Alúvio (C), Laterita (D), Saprolito (E) e Carbonatito (F).

7.4. Densidade

A densidade média das unidades presentes no depósito foi calculada através de 475 amostras. Os valores podem ser encontrados na Tabela 4.

Tabela 4 - Dados de densidade em g/cm³ para os litotipos presentes no depósito.

Estatística	Densidade					
	Solo	Colúvio/ Alúvio	Intervalo Caulinítico	Laterita	Saprolito	Carbonatito
Número de amostras	11	52	28,00	83	287	14
Mínimo	1,48	1,62	1,55	1,24	1,11	2,23
Máximo	2,84	3,16	2,48	3,42	3,15	3,53
Média	2,02	2,03	1,86	2,51	1,95	2,80
Mediana	1,94	1,92	1,88	2,58	1,84	2,86
Primeiro Quartil	1,78	1,82	1,67	2,18	1,67	2,41
Terceiro Quartil	2,23	2,09	2,00	2,87	2,16	2,97
Variância	0,14	0,12	0,05	0,25	0,16	0,15
Desvio Padrão	0,38	0,34	0,22	0,50	0,40	0,39
Coeficiente de Variação	0,19	0,17	0,12	0,20	0,20	0,14

8. Modelagem Geoestatística

8.1. Análise Variográfica

A continuidade espacial dos valores de TREO foi avaliada por meio da variografia. Os variogramas foram criados utilizando o *software* SGeMS.

Na primeira etapa foram utilizados os dados obtidos após regularização do comprimento de amostra para os processos variográficos. O variograma omnidirecional foi construído para identificar possíveis estruturas (anisotropia), utilizando os parâmetros que estão discriminados na Tabela 5.

Tabela 5 - Parâmetros para o cálculo dos variogramas omnidirecionais para a variável TREO.

Parâmetros Variograma Omnidirecional	
Número de Passos	40
Separação do Passo	10
Tolerância do Passo	0,1

O variograma experimental gerado, ajustado no modelo esférico pode ser visualizado na Figura 26.

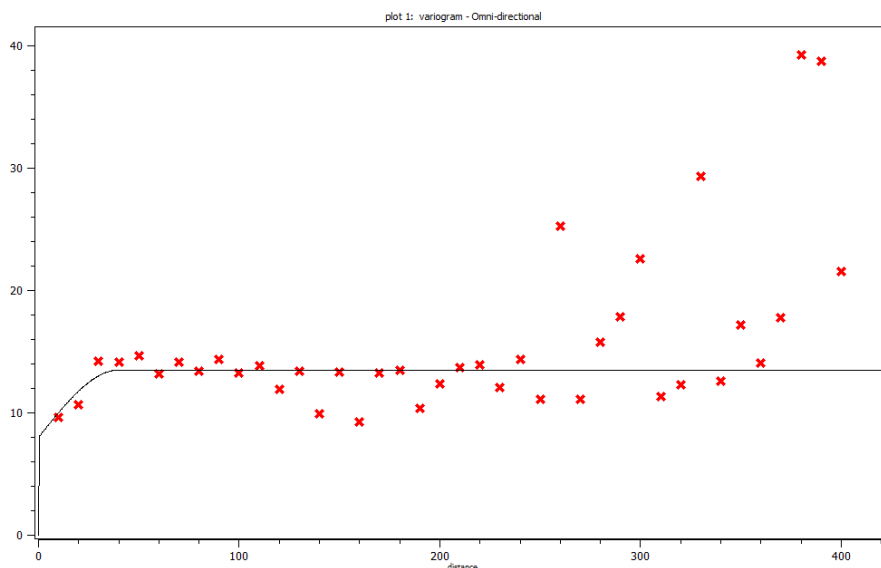


Figura 26 - Variograma omnidirecional para os teores de TREO. Efeito pepita: 8; Patamar: 13; Amplitude: 40.

A análise do variograma omnidirecional permitiu que se identificasse uma estruturação nos dados e, para que a direção de maior continuidade fosse encontrada, foram confeccionados variogramas em 9 direções. Os parâmetros utilizados encontram-se na Tabela 6.

Tabela 6 - Parâmetros para o cálculo dos variogramas direcionais para as os teores de TREO.

Parâmetros Variograma					
Azimute/Mergulho	Número de Passos	Separação do Passo	Tolerância do Passo	Tolerância Angular	Largura da Banda
0 / 0	30	10	0,1	22,5	10
22,5 / 0	30	10	0,1	22,5	10
45 / 0	30	10	0,1	22,5	10
67,5 / 0	30	10	0,1	22,5	10
90 / 0	30	10	0,1	22,5	10
112,5 / 0	30	10	0,1	22,5	10
135 / 0	30	10	0,1	22,5	10
157,5 / 0	30	10	0,1	22,5	10
0/90	20	2	0,1	5	2

A direção de maior continuidade para as amostras foi a de Azimute 67,5° e Mergulho 0°, como pode ser verificado na Figura 27. Adotou-se a direção perpendicular 157,5° como a direção de menor continuidade (Figura 28), já que foi a única onde o variograma pode ser ajustado. O variograma para a direção vertical encontra-se na Figura 29.

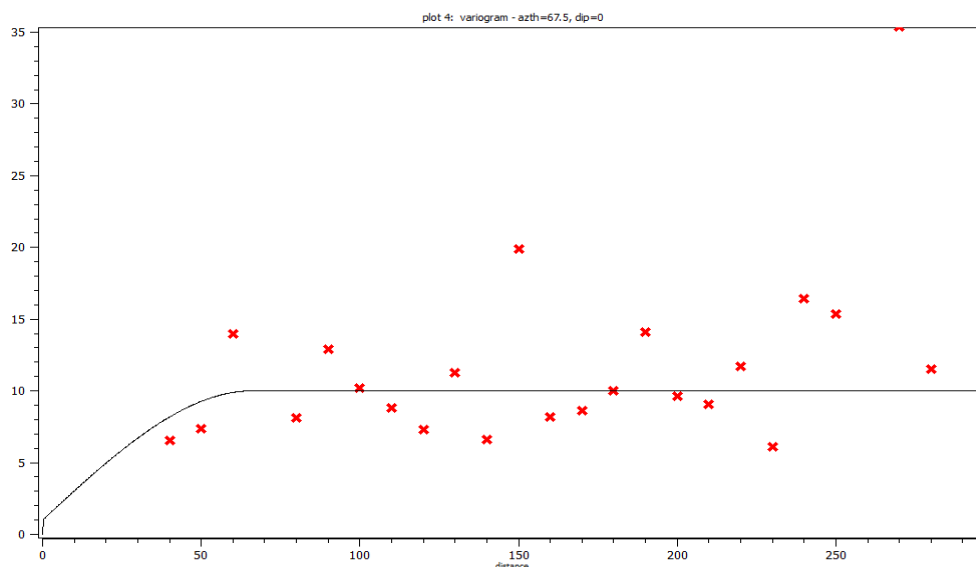


Figura 27 - Variograma direcional (67,5/0) para os teores de TREO. Efeito pepita: 1; Patamar: 10; Amplitude: 66.

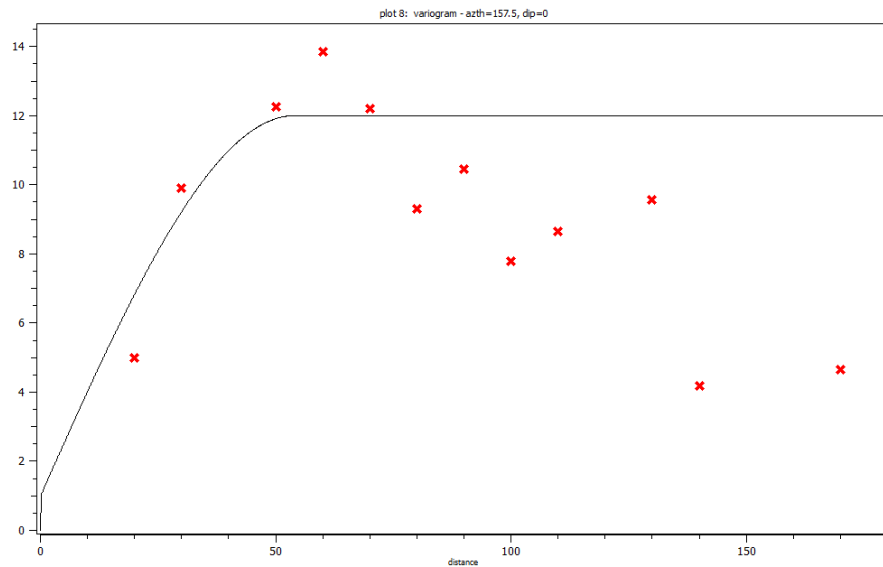


Figura 28 - Variograma direcional (157,5/0) para os teores de TREO. Efeito pepita: 1; Patamar: 11; Amplitude: 52.

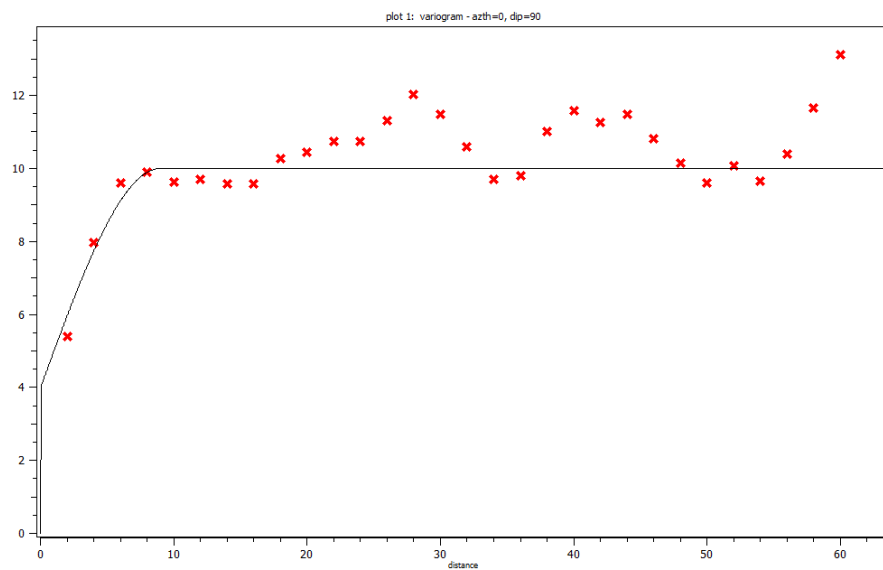


Figura 29 - Variograma vertical (0/90) para os teores de TREO ajustado no modelo esférico. Efeito pepita: 4; Patamar: 10 e; Amplitude: 9.

Com o intuito de melhorar a análise variográfica e, conseqüentemente, definir a estruturação das amostras, optou-se pela substituição/exclusão dos *outliers*. Como os mesmos aumentam a dispersão dos dados em torno da média, contribuindo para o aumento da variância, os valores que se encontravam entre $\pm$ duas vezes o valor do desvio padrão sobre a média foram substituídos. Para os dados duas vezes o desvio padrão abaixo da média, o limite estabelecido foi 0.

Considerou-se dois cenários:

1 - Substituição dos *outliers* pelo valor de 12,136% de TREO (o valor máximo assumido é igual a média somada duas vezes o desvio padrão);

2 - Exclusão dos *outliers* para a análise variográfica. Nesse processo, 157 dados foram excluídos da população amostral.

A Figura 30 exibe os histogramas gerados para as duas situações. Para a população amostral em que os *outliers* foram substituídos, uma nova moda foi criada, definindo assim o histograma como bimodal. Para os dados em que a exclusão dos *outliers* foi efetuada, a distribuição dos dados assemelhou-se a uma distribuição normal, sendo corroborada pela aproximação entre os dados de média e mediana. O resumo estatístico pode ser visualizado na Tabela 7.

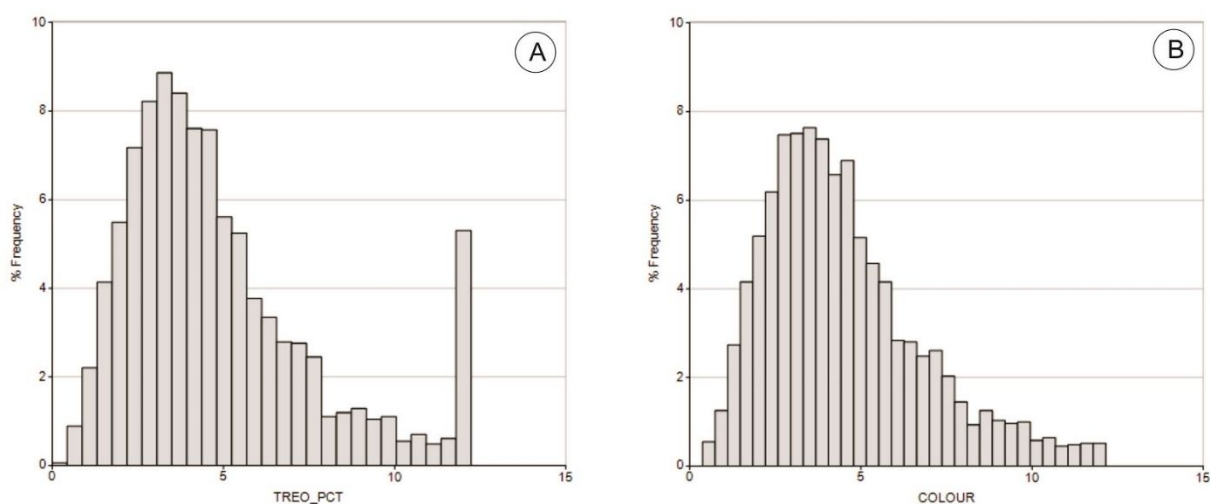


Figura 30 - Histograma dos teores de TREO (%) para a população com *outliers* substituídos pelo valor da média + duas vezes o desvio padrão (A) e com exclusão dos *outliers* (valores maiores do que média + 2 vezes o desvio padrão) (B).

Para os novos conjuntos de dados gerados, a análise variográfica foi repetida utilizando os parâmetros descritos nas Tabelas 5 e 6.

Tabela 7 - Estatísticas descritivas para os valores de TREO, para as amostras com *outliers* substituídos e *outliers* excluídos da população.

Estatística	Substituição dos outliers	Exclusão dos outliers
Número de amostras	3282	3125
Mínimo	0,381	0,381
Máximo	12,136	12,122
Média	4,864	4,496
Mediana	4,143	3,924
Primeiro Quartil	2,884	2,837
Terceiro Quartil	6,069	5,668
Variância	7,751	5,332
Desvio Padrão	2,784	2,309
Coefficiente de Variação	0,572	0,514

4.4.3. 8.1.1. População com substituição dos outliers

O variograma omnidirecional para os dados com substituição dos *outliers* apresentou estruturação melhor do que o gerado para as amostras originais regularizadas (Figura 31). A amplitude aumentou 20 metros com diminuição do efeito pepita.

A direção de maior continuidade foi definida para a direção 22,5/0 ao contrário da direção 67,5/0 previamente estabelecida (Figura 32). Para essa análise, a direção 67,5/0 não apresentou nenhuma estruturação, estabelecendo aleatoriedade nos dados. A direção de menor continuidade foi a mesma estabelecida para as amostras originais regularizadas (157,5/0) (Figura 33).

O variograma vertical (0/90) apresentou melhor estruturação, como pode ser visualizado na Figura 34. Em relação ao previamente modelado (amostras originais regularizadas) houve um incremento da amplitude passando de 9 para 21 metros e diminuição do efeito pepita de 4 para 3,2.

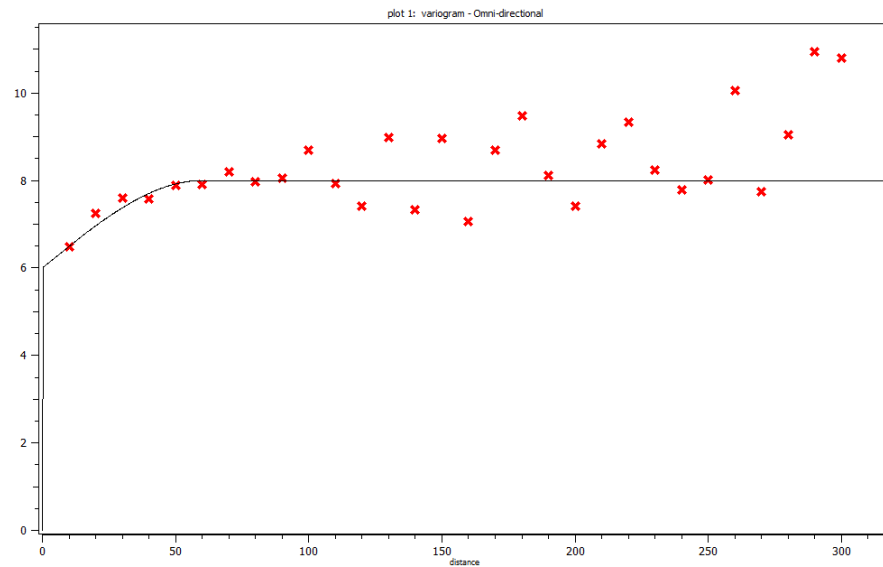


Figura 31 - Variograma omnidirecional para os teores de TREO com substituição dos *outliers* ajustado no modelo esférico. Efeito pepita: 6; Patamar: 8 e; Amplitude:60.

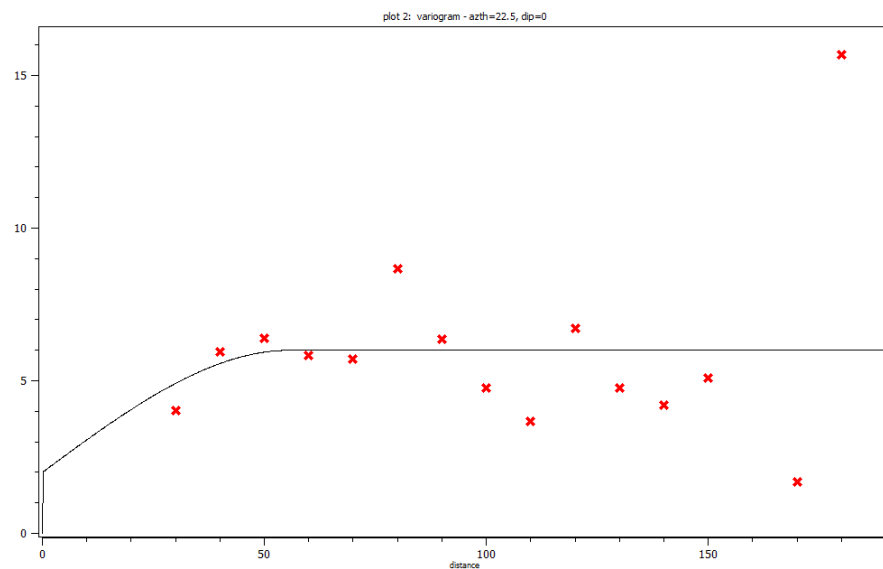


Figura 32 - Variograma direcional (22,5/0) para os teores de TREO com substituição dos *outliers* ajustado no modelo esférico. Efeito pepita: 2; Patamar: 6; Amplitude: 51.

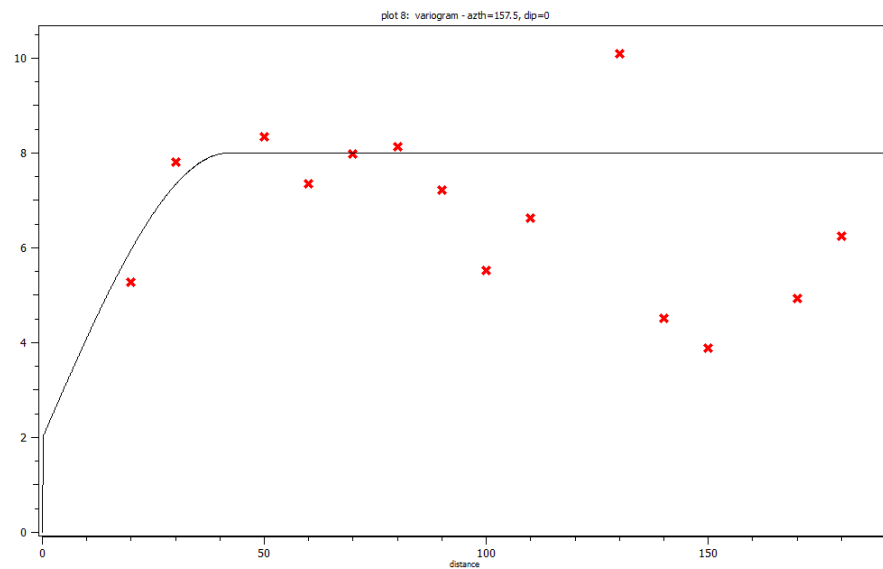


Figura 33 - Variograma direcional (157,5/0) para os teores de TREO com substituição dos *outliers* ajustado no modelo esférico. Efeito pepita: 2; Patamar: 8; Amplitude: 42.

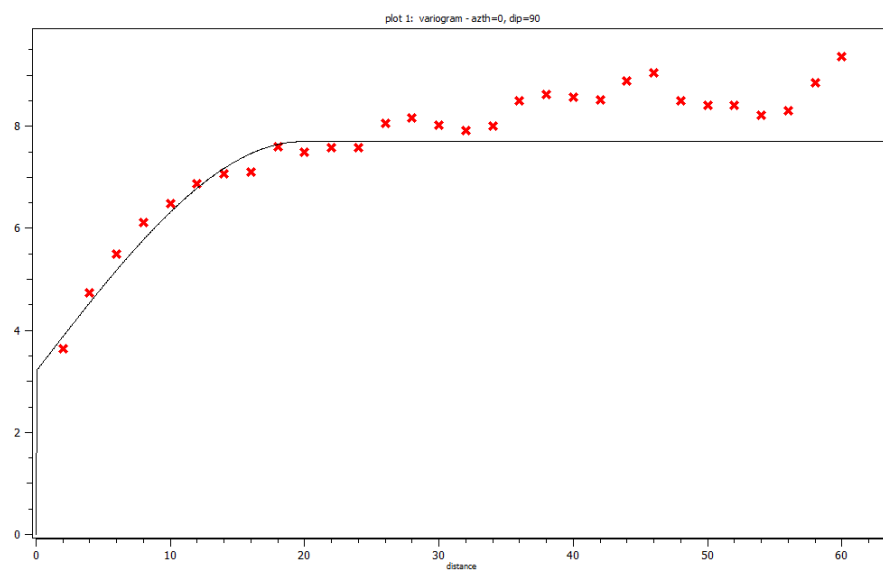


Figura 34 - Variograma vertical (0/90) para os teores de TREO com substituição dos *outliers* ajustado no modelo esférico. Efeito pepita: 3,2; Patamar: 7,7 e; Amplitude: 21.

4.4.4. 8.1.2. População com exclusão dos *outliers*

O processo variográfico iniciou-se com a criação do variograma omnidirecional para os dados com exclusão dos *outliers*. A Figura 35 exibe o variograma gerado, sem qualquer estruturação definida, assemelhando-se ao efeito pepita puro. O ponto inicial apresenta apenas 26 pares de pontos não sendo representativo para a modelagem.

A modelagem utilizando os parâmetros da Tabela 6, com exceção da direção 0/90, resultou em um variograma sem estruturação aparente, configurando aleatoriedade nos dados (efeito pepita puro).

Com base nos resultados gerados, desconsiderou-se esse processo para avaliação de recursos.

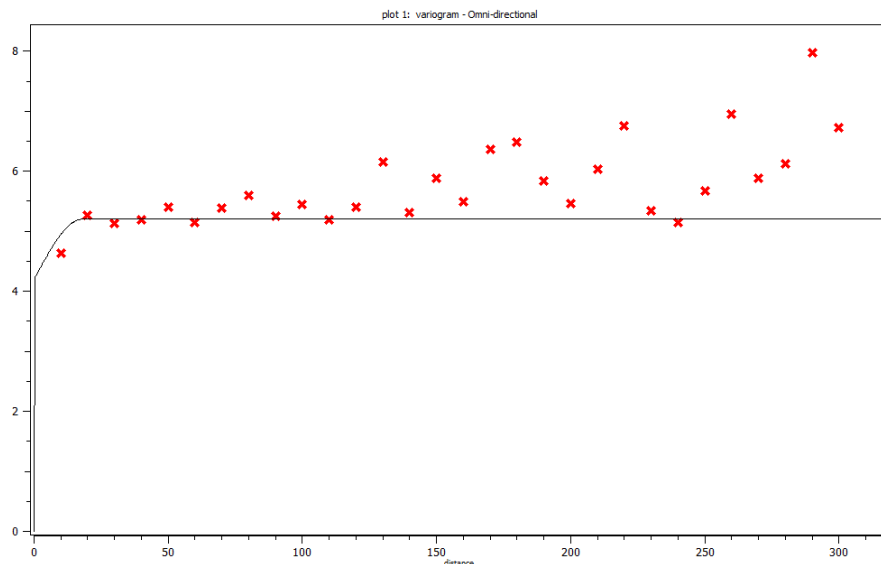


Figura 35 - Variograma omnidirecional para os teores de TREO com exclusão dos *outliers* ajustado no modelo esférico. Efeito pepita: 4,2; Patamar: 5,3 e; Amplitude:17

A comparação entre as propriedades dos variogramas gerados para as amostras originais regularizadas e as amostras com substituição dos valores dos *outliers* encontra-se na Tabela 8. De maneira geral, os variogramas para as amostras após a substituição dos *outliers* foram melhor ajustados, e esses dados serão utilizados para a próxima etapa: cálculo de recursos.

Tabela 8 - Tabela comparativa entre as propriedades dos variogramas entre as amostras regularizadas e as com substituição dos *outliers*.

Amostras	Variogramas	Propriedades dos Variogramas		
		Efeito Pepita	Patamar	Amplitude
Originais Regularizadas	Omnidirecional	8	13	40
	Maior continuidade (67,5/0)	1	10	66
	Menor continuidade (157,5/0)	1	11	52
	Vertical (90/0)	4	10	9
Substituição dos <i>outliers</i>	Omnidirecional	6	8	60
	Maior continuidade (22,5/0)	2	6	51
	Menor continuidade (157,5/0)	2	8	42
	Vertical (90/0)	3,2	7,7	21

9. Avaliação de Recursos

Antes de efetuar os cálculos para avaliação de recursos, aplicando o método de estimativa escolhido (krigagem ordinária), um modelo de blocos foi construído.

O modelo de blocos é um conjunto de células e subcélulas retangulares (Figura 36) espacialmente georreferenciadas que representam o volume de interesse, contendo as variáveis que se pretende analisar, no caso desse trabalho os teores de ETR.

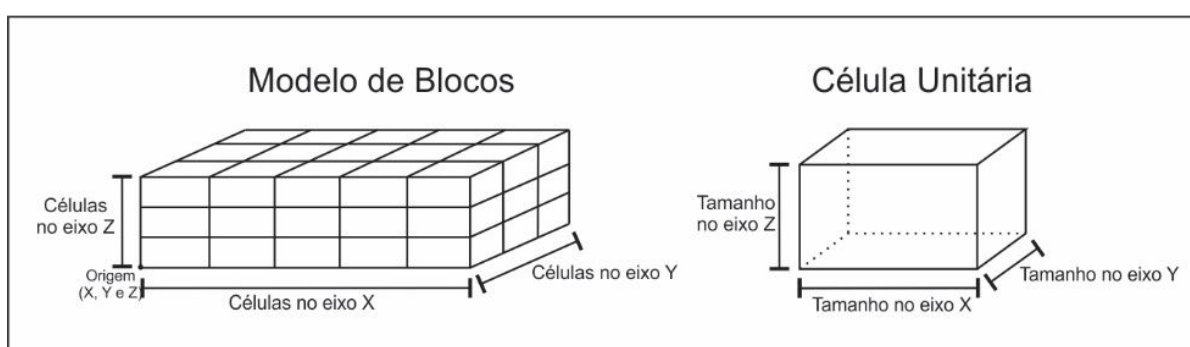


Figura 36 - Esquema exemplificando um modelo de blocos.

O tamanho das células pode ser definido através do espaçamento entre furos, métodos de lavra e estruturas geológicas. A Tabela 9 exhibe os parâmetros utilizados nesse trabalho.

Tabela 9 - Dados utilizados para a construção do modelo de blocos.

Coordenadas	X	Y	Z
Máximo	297028	7826400	1120
Mínimo	296537	7826240	875
Distância	491	160	245
Tamanho da Célula	10	10	3
Quantidade de células	49	16	82

Definiu-se o tamanho do bloco de 10 m x 10 m x 3m, totalizando um total de 49 blocos na direção X, 16 blocos na direção Y e 82 blocos na direção Z. Para a definição da altura de 3 m (direção Y). A caixa criada, que será preenchida pelos blocos, englobando a área do depósito, pode ser visualizada na Figura 37.

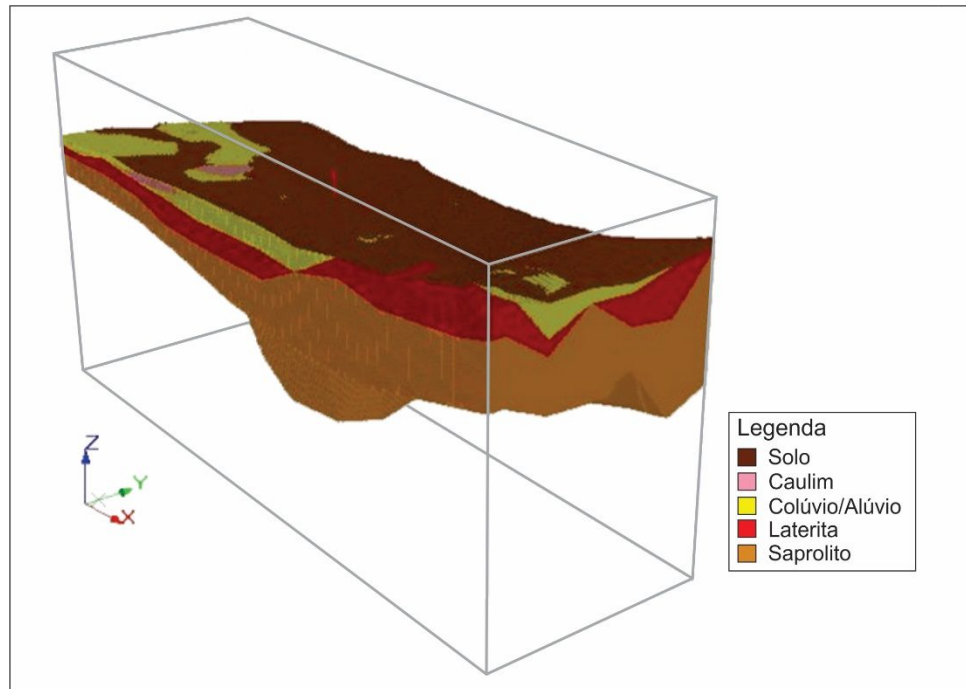


Figura 37 - Relação entre a caixa limite do modelo de blocos com o modelo tridimensional do depósito. O eixo Y indica o Norte.

O tamanho definido na Tabela 9 será o tamanho máximo que a célula (ou bloco) poderá assumir, porém como o contato geológico será preservado e, até mesmo, o limite da superfície topográfica, subcélulas podem ser criadas, como exemplificado na Figura 38. Os blocos de tamanho máximo são divididos para se enquadrar às formas dos corpos mineralizados.

9.1. Quantificação de Recursos

Com a conclusão do modelo de blocos e a definição dos parâmetros do variograma (Tabela 8), o elipsoide de busca foi construído. Mesmo o variograma indicando uma direção de continuidade de 51 metros (direção 22,5/0) e 60 metros (omnidirecional) definiu-se que o maior raio de busca do elipsoide seria de 45 metros na direção Y, com o objetivo de realizar uma modelagem mais conservadora e robusta. O elipsoide de busca utilizado foi rotacionado 22,5° no eixo Y, o eixo X apresentando raio de busca de 30 m e Z com raio de busca de até 14 m.

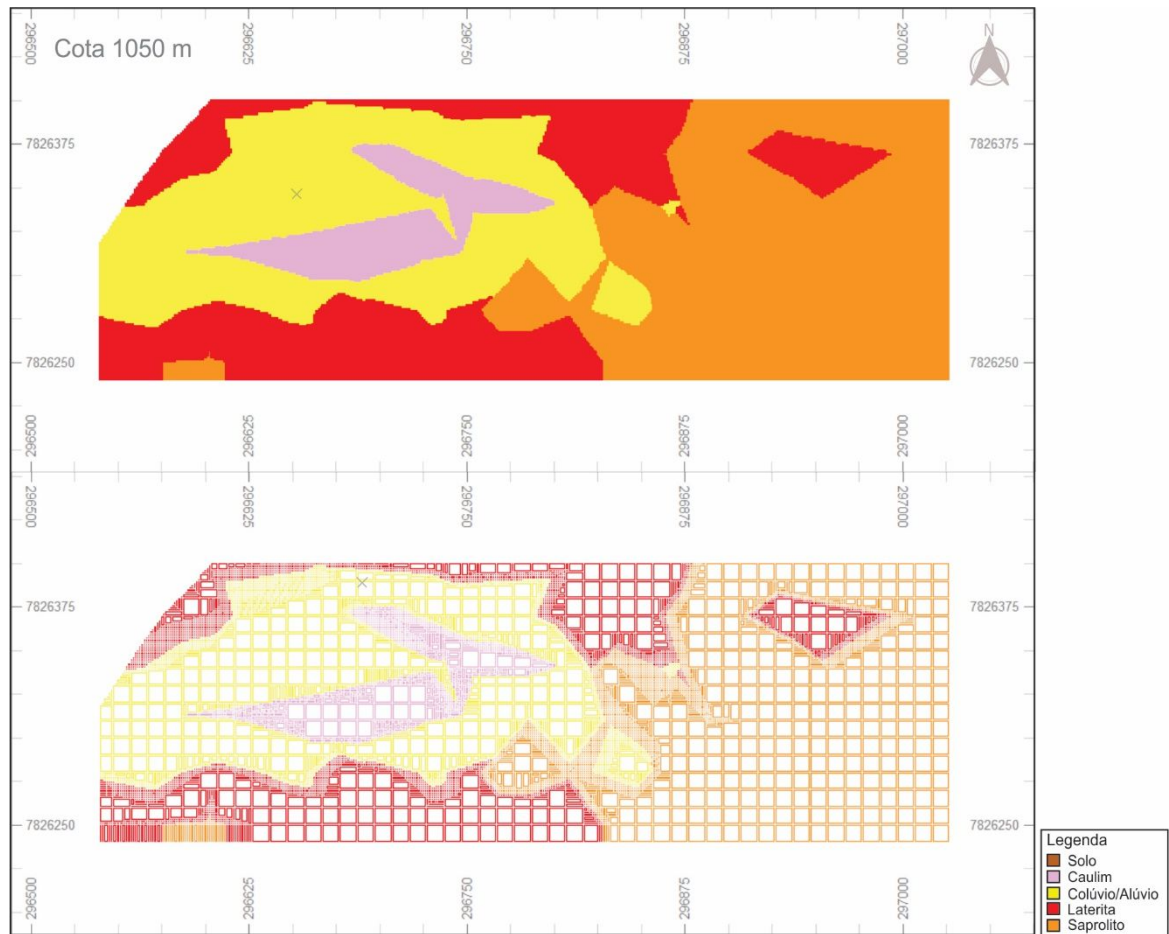


Figura 38 – Vista em planta na cota 1050 m mostrando as subcélulas criadas mantendo o contato geológico das unidades definidas para o depósito.

Com os parâmetros definidos, a krigagem ordinária foi aplicada para a estimativa de recursos do Depósito de Terras Raras Área Zero. O modelo tridimensional estimado encontra-se na Figura 39.

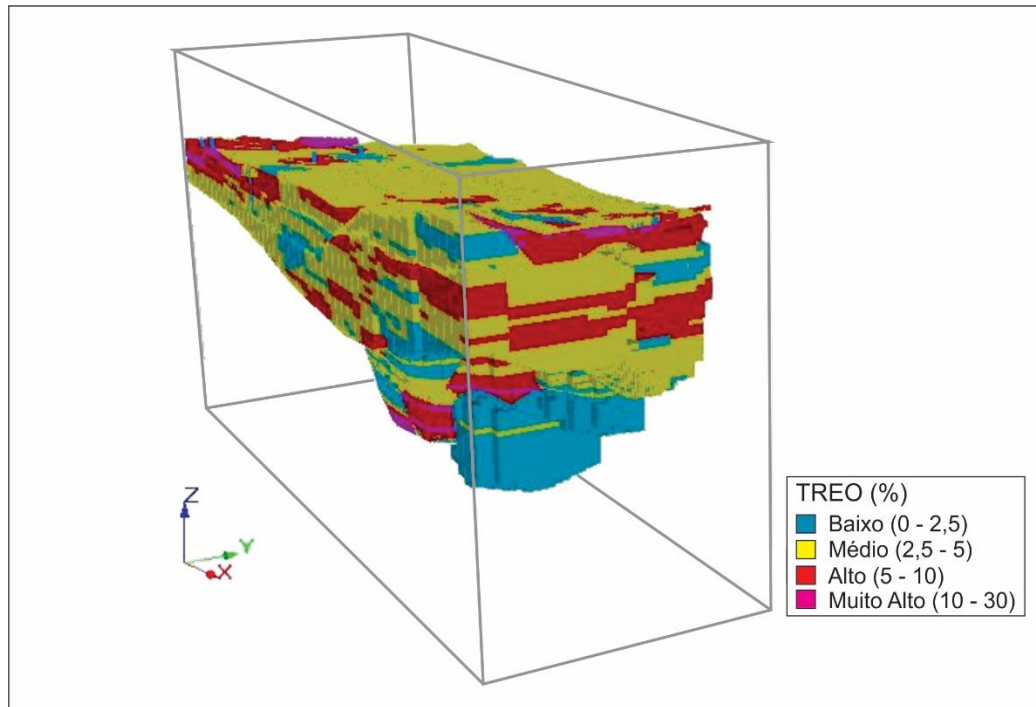


Figura 39 - Modelo de blocos exibindo o resultado da krigagem ordinária para os teores de TREO. O eixo Y indica o Norte.

A Figura 40 ilustra uma seção E-W (Seção 1) efetuada em que se pode constatar que os maiores valores de TREO se encontram na unidade colúvio/alúvio, nas porções superficiais do modelo e em algumas porções saprolíticas. Mesmo com essa visualização, não é possível definir claramente uma estruturação da mineralização.

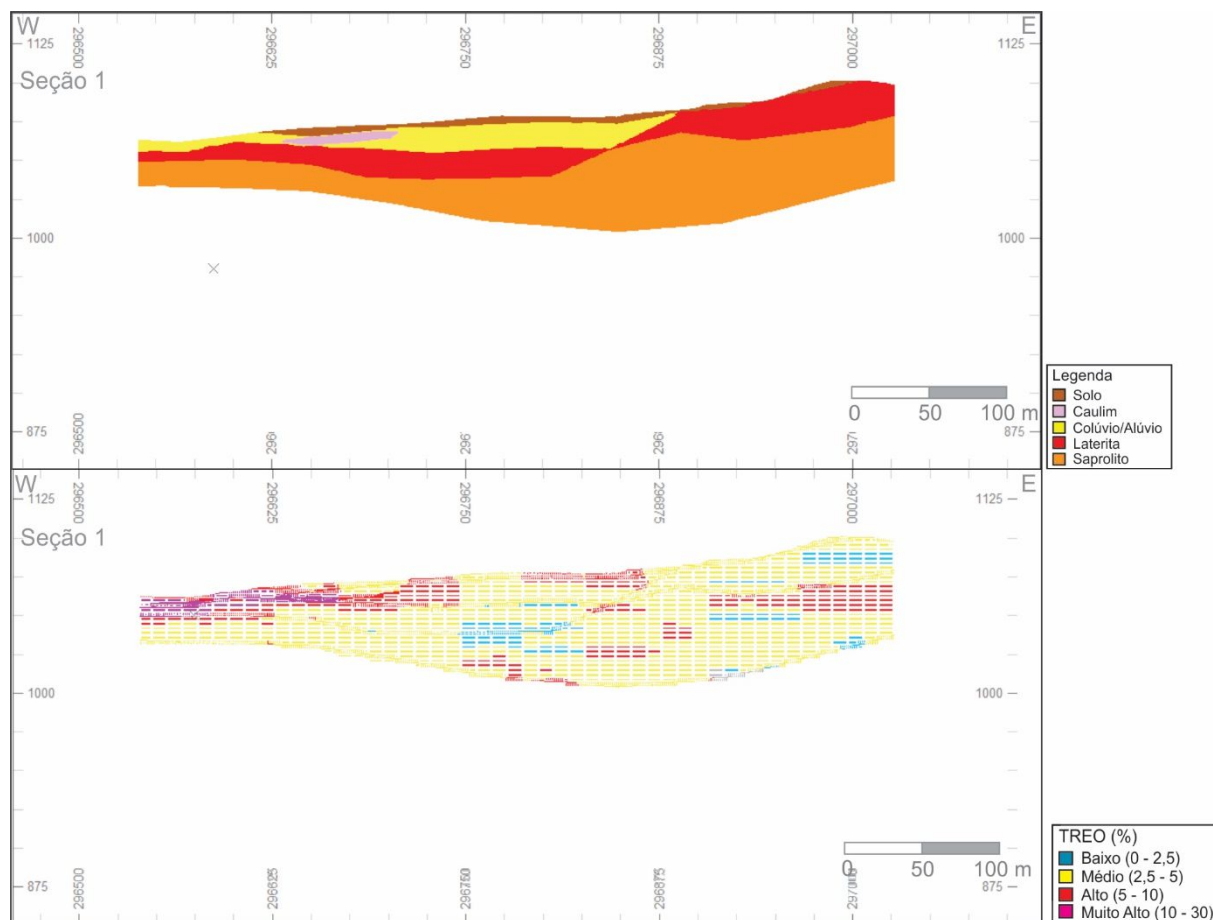


Figura 40 - Seção E-W (Seção 1) comparando o modelo geológico com o modelo de blocos com os teores de TREO estimados por krigagem ordinária.

Os resultados da avaliação de recursos encontram-se na Tabela 10.

Tabela 10 - Recursos estimados para o Depósito de Terras Raras Área Zero.

Litotipo	Tonelagem	Volume (m³)	Teor TREO (%)
Solo	319.463,52	158.150,25	3,59
Intervalo caulinitico	182.423,28	98.077,03	4,70
Colúvio/Alúvio	1.470.024,95	724.150,22	7,37
Laterita	1.713.397,64	682.628,54	4,74
Saprolito	6.815.510,51	3.495.133,59	4,25
Total	10.500.819,90	5.158.139,63	4,75

Os recursos totais avaliados para o depósito são de 10,5 milhões de toneladas com teor de TREO de 4,75 %.

9.2. Validação da Krigagem

Para a validação dos dados da krigagem, foi efetuada a comparação entre os dados de estatística descritiva estimados por krigagem ordinária e os dados para as amostras originais regularizadas (Tabela 11). Além dos dados estatísticos analisou-se a distribuição dos dados no diagrama de frequências (Figura 41).

A média de TREO aumentou de 5,072% para 5,272% nos dados estimados por krigagem ordinária, não ocasionando grandes variações para a estimativa. A variância diminuiu de 12,474 para 10,998 evidenciando uma leve suavização dos dados, o que já é esperado para a krigagem ordinária.

O histograma apresenta o mesmo comportamento encontrado nas amostras originais regularizadas (Figura 24), sendo unimodal, assimétrico positivo configurando uma distribuição lognormal. Dessa forma, define-se que o processo de estimativa foi satisfatório para o depósito analisado.

Tabela 11 – Comparação entre os dados estatísticos para teores de TREO das amostras originais regularizadas e blocos estimados por krigagem ordinária.

Estatística	Amostras Regularizadas	Modelo de Blocos Krigagem Ordinária
Número de amostras/ Número de blocos	3282	422461
Mínimo	0,381	0,431
Máximo	31,976	25,554
Média	5,072	5,272
Mediana	4,195	4,415
Primeiro Quartil	2,884	3,013
Terceiro Quartil	6,031	6,604
Variância	12,474	10,998
Desvio Padrão	3,532	3,316
Coeficiente de Variação	0,696	0,629

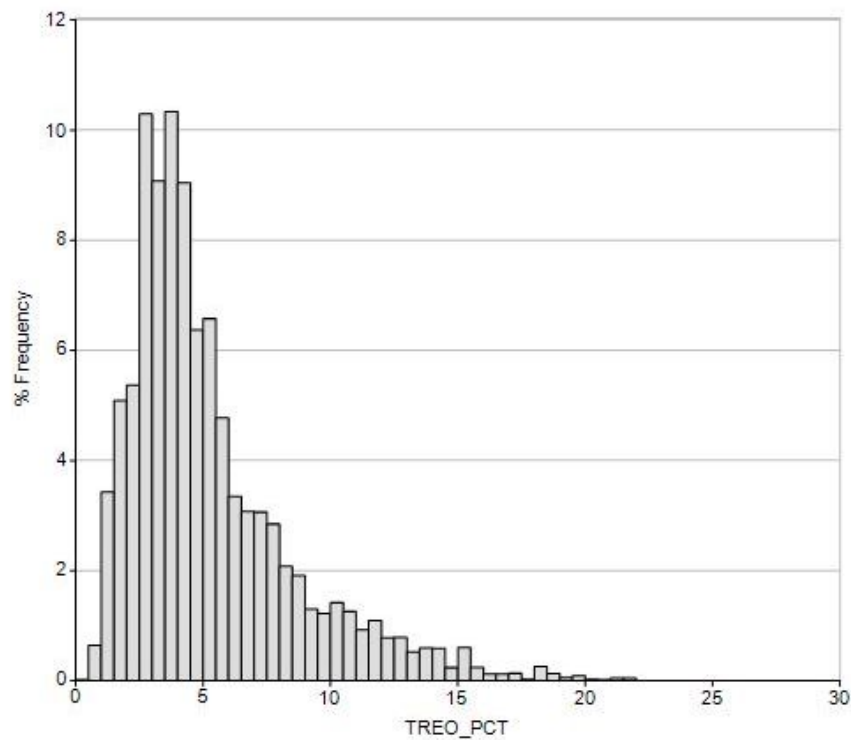


Figura 41 - Histograma dos teores de TREO (%) para os blocos estimados por krigagem ordinária.

9.3. Curva tonelagem x teor

A curva de tonelagem x teor, também chamada de curva de parametrização, é uma importante ferramenta que permite a determinação da vida útil do empreendimento mineiro. Através dessa curva, pode-se obter, utilizando diferentes teores de corte, a tonelagem do depósito. A Figura 42 mostra a curva de parametrização para o Depósito Área Zero. Reduzindo-se o valor do teor de corte de TREO, a tonelagem do depósito aumenta e aumentando-se o teor de corte a tonelagem diminui.

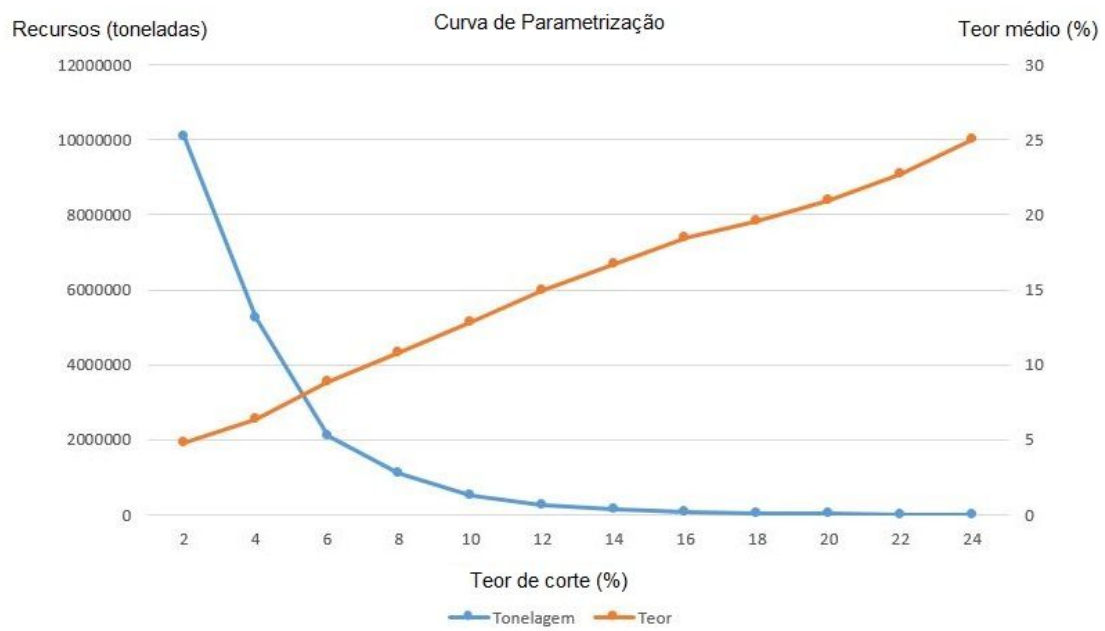


Figura 42 - Curva de parametrização para o Depósito Área Zero.

10. Conclusões

Antes de iniciar a modelagem e quantificação de recursos, a validação do banco de dados deve ser considerada uma das etapas mais importantes do trabalho. Para esse estudo, além da correção de lacunas nas amostragens, deslocamentos topográficos e furos de sondagem sem descrição, optou-se por regularizar o tamanho das amostras. A regularização amostral definiu quase o mesmo suporte para as amostras, gerando dados mais confiáveis e diminuindo os erros durante a estimativa.

A modelagem geológica permitiu a visualização e correlação entre as unidades em profundidade, onde foi possível perceber uma pequena calha de deposição (bacia) na porção oeste da área, onde são encontradas as maiores espessuras de colúvio/alúvio. A deposição dessa unidade está intimamente ligada ao retrabalhamento do carbonatito (saprolito) e laterita encontrados na porção leste da área, em uma área mais elevada.

A análise estatística, posteriormente confirmada pela krigagem ordinária, indicou que todas as unidades descritas para o depósito estão mineralizadas. Do topo para a base encontram-se o solo com teor médio de 3,59% de TREO, o intervalo caulínítico, muitas vezes referido como caulim, com 4,70% de TREO, a unidade colúvio/alúvio com 7,37% de TREO, a laterita com 4,74% de TREO e o saprolito (alteração do carbonatito) com 4,25% de TREO. Esses teores foram definidos a partir da krigagem ordinária. Optou-se por não estimar os valores de carbonatito (rocha sã) por se encontrar apenas em dois furos de sondagem, porém a análise estatística das amostras define um teor médio de 1,41% de TREO.

Os ETR no depósito apresentam alta variabilidade, configurando uma distribuição lognormal, com muitos dados com teores baixos e poucos dados com valores altos. Devido a esse aspecto a variografia foi dificultada, com muitos variogramas configurando aleatoriedade, ou seja, efeito pepita puro. O método de substituição dos *outliers* pelo valor da média + 2 vezes o desvio padrão, diminuiu a variabilidade do depósito, suavizando os dados e permitindo o melhor ajuste dos variogramas que foram utilizados para a estimativa de recursos.

A análise dos variogramas experimentais, ajustados no modelo esférico, permitiu que a direção de maior continuidade fosse determinada, sendo ela a de azimuth 22,5° com as amostras estruturadas até um alcance de 51 metros. O alcance definido é maior do que a malha de sondagem (~30 m) proporcionando confiabilidade na estimativa.

Para o depósito estudado, mesmo apresentando uma alta variabilidade de dados, a krigagem ordinária se mostrou um método eficiente para a modelagem e estimativa de recursos. Através dos parâmetros estatísticos entre o modelo de blocos e as amostras originais regularizadas dos testemunhos de sondagem, os dados de krigagem foram validados, em que a diferença na média de teores de TREO foi de 0,2 % representando uma diferença entre dados menor do que 4.7 %.

O modelo de blocos krigado para os teores de TREO não permitiu que um controle da mineralização no depósito fosse definido. Sabe-se que a unidade colúvio/alúvio apresenta os maiores valores com média de 7,37 % de TREO, porém a distribuição de teores nas outras unidades não se comporta de maneira homogênea.

A tonelagem do total do depósito com um teor de corte de 0,4% é de 10,5 milhões de toneladas com um teor médio de 4,75 % de TREO.

Referências

- ANDRIOTTI, J.L.S. Fundamentos de Estatística e Geoestatística. Editora Unisinos, 2005. 166 p.
- BURROUGH, P. Principles of geographical information systems for land resources assessment. Oxford, Clarendon Press, 1987. 193p.
- CORREA, S.M.B.B. Probabilidade e estatística. 2 ed. PUC Minas Virtual, Belo Horizonte, 2003. 116p.
- GIBSON, S.A.; THOMPSON, R.N.; DICKINA, P.; LEONARDOSO, H. High-Ti and low-Ti mafic potassic magmas: Key to plume-lithosphere interactions and continental flood-basalt genesis. *Earth and Planetary Science Letters*. 1995. Vol. 136. p. 149-165.
- GUERRA, P.A.G. Geoestatística operacional. Brasília: Departamento Nacional de Produção Mineral, 1988. 145 p.
- ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. Applied geostatistics: introduction to applied geostatistics. Oxford University Press, New York, 1989. 561 p.
- ISSA FILHO, A.; LIMA, P.R.A.S.; SOUZA, O.M. Aspectos da geologia do complexo carbonatítico do Barreiro, Araxá, MG, Brasil. *In: CBMM, Complexos Carbonatíticos do Brasil: Geologia*. São Paulo, CBMM, 1984. p. 20-44.
- JOURNEL, A.G.; HUIJBREGTS, J.C.H. Mining geostatistics. New York: Academic Press, 1978. 600p.
- LANDIM, P. M. B.; STURARO, J. R. Krigagem indicativa aplicada à elaboração de mapas probabilísticos de riscos. Rio Claro: IGCE/UNESP, Lab. Geomatemática, Texto Didático 06. 2002. 19 p. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/251884208_KRIGAGEM_INDICATIVA_APLICADA_A_ELABORACAO_DE_MAPAS_PROBABILISTICOS_DE_RISCOS>. Acesso em: 18 ago. 2016.
- LAPIDO-LOUREIRO, F.E.; SANTOS, R.L.C. Terras Raras no Brasil: Reservas, Características Químico-Mineralógicas de suas Ocorrências e Depósitos. *In: O Brasil e a Reglobalização da Indústria de Terras Raras*. CETEM/MCTI, Rio de Janeiro, 2013. Capítulo 2. p. 68-144.
- MATHERON, G. Principles of Geostatistics. *Economic Geology*, Lancaster, Vol. 58. 1963. p. 1246-1266.
- MATHERON, G. The Theory of Regionalized Variables and Its Applications. *Les Cahiers du Centre de Morphologie Mathématique de Fontainebleau*. École Nationale Supérieure des Minas de Paris, 1971, Fascicule 5. 212p.
- MOTTA, P.E.; BARUQUI, A.M.; SANTOS, H.G. Levantamento de reconhecimento de média intensidade dos solos da região do Alto Paranaíba, Minas Gerais. *Embrapa Solos. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento*. Rio de Janeiro, 2004. No. 44.

NEWMANN, R.; MEDEIROS, E.R. Comprehensive mineralogical and technological characterisation of the Araxá (SE Brazil) complex REE (Nb-P) ore, and the fate of its processing. *International Journal of Mineral Processing*. 2015. Vol. 144. p. 1-10.

ORTIZ, C.E.A.; VIANA JÚNIOR, E.M. Rare earth elements in the international economic scenario. *Revista da Escola de Minas, Ouro Preto*, 67 (4). 2014. p. 361-366.

RIBEIRO, J. F.; WALTER, B. M. T. Fitofisionomias do Bioma Cerrado. In: SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P. *Cerrado: ambiente e flora*. Planaltina: Embrapa - CPAC, 1998. p. 89-166.

ROCHA, M.B.B; ROSA, R. O meio físico e o uso da terra no município de Araxá-MG. *Revista Brasileira de Geomorfologia*. 2009. Vol. 10, No. 1. p. 55-62.

ROSSI, M. E.; DEUTSCH, C. V. *Mineral resource estimation*. New York: Springer, 2014.

SARMA, D.D. *Geostatistics With Applications in Earth Sciences*. 2 Ed. India, Springer, 2009.

SEER, H.J. *Evolução Tectônica dos Grupos Araxá, Ibiá e Canastra na sinforma de Araxá, Minas Gerais*. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências. Universidade de Brasília, 1999. 267 p.

SILVA, C.H.; SIMÕES, L.S.A.; KRYMSKY, R.; MACAMBIRA, M.J.B. Proveniência e Idade do Metamorfismo das Rochas da Faixa Brasília, na Região de Tapira (SW de Minas Gerais). *Revista do Instituto de Geociências – Usp. São Paulo*, 2006. Vol. 6, n.1. p. 53-66.

SILVA, A.B. Jazida de nióbio de Araxá, Minas Gerais. In: SCHOBENHAUS, C.; QUEIROZ, E.T.; COELHO, C.E.S. (Eds) *Principais depósitos minerais brasileiros – ferro e metais da indústria do aço*. MME/DNPM, Brasília, 1986. Vol. 2. p. 456-462.

SINCLAIR, A.J.; BLACKWELL, G.H. *Applied Mineral Inventory Estimation*. Cambridge University Press. Cambridge, UK, 2004.

STURGES, A.H. The Choice of a Class Interval. *Journal of the American Statistical Association*. Vol. 21, No. 153 (Mar., 1926). p. 65-66.

TRAVERSA, G.; GOMES, C.B.; BROTZU, P.; BURAGLINI, N.; MORBIDELLI, L.; PRINCIPATO, M.S.; RONCA, S.; RUBERTI, E. Petrography and mineral chemistry of carbonatites and mica-rich rocks from the Araxá complex (Alto Paranaíba Province, Brazil). In: *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, Rio de Janeiro, 2001. vol.73 p.71-98.

VALERIANO, C. M.; DARDENNE; M. A., FONSECA, M.A.; SIMÕES, L.S.A.; SEER, H.J. A Evolução Tectônica da Faixa Brasília. In: *Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. MANTESSO-NETO, V.; BARTORELLI, A., CARNEIRO, C.D.R., BRITO NEVES, B.B. São Paulo, 2004. Editora Beca. Cap 32, p. 575-592.

VONCKEN, J.H.L; *The Rare Earth Elements: An Introduction*. Springer. 2016. 127p.

WARING, M.H.; TEDESCO, M.A.; CARVALHO, M.S.; OLIVEIRA, A.S.D. A Geologia do Depósito de Fosfato e Terras Raras do Projeto Araxá - MbAC Fertilizantes. In: III Simpósio Brasileiro de Metalogenia, 2013.

YAMAMOTO, J.K. Análise geoestatística In: Yamamoto, J.K. (org.). Avaliação e classificação de reservas minerais. São Paulo, Edusp, 2001. p. 69-92.

YAMAMOTO, J.K.; BETTENCOURT, J.S. e MONTANHEIRO, T.J. Análise estatística In: Yamamoto, J.K. (org.). Avaliação e classificação de reservas minerais. São Paulo, Edusp, 2001. p. 49-68.

YAMAMOTO, J.K.; ROCHA, M.M. Inventário e Avaliação dos Parâmetros Geológicos e Geométricos Para o Cálculo de Reservas. In: Yamamoto, J.K. (org.). Avaliação e classificação de reservas minerais. São Paulo, Edusp, 2001. p. 35-48.