

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

AVALIAÇÃO DOS RECURSOS MINERAIS DE ZINCO E CHUMBO DE  
UM DEPÓSITO NO NOROESTE DO ESTADO DE MINAS GERAIS

Daniel Antunes de Carvalho

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Monteiro da Rocha

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA  
(TF-2011 / 12)

SÃO PAULO  
2011

TF  
C331  
DA.a

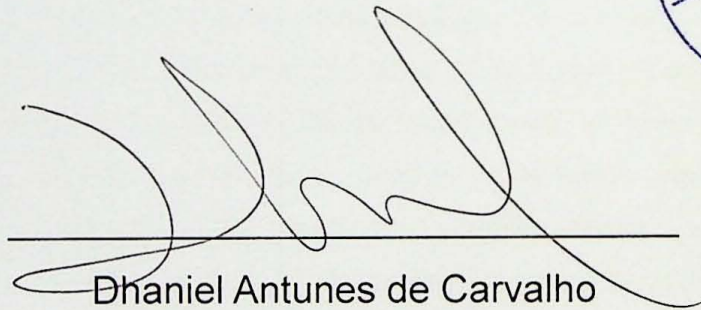
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

AVALIAÇÃO DOS RECURSOS MINERAIS DE ZINCO E CHUMBO DE UM  
DEPÓSITO NO NOROESTE DO ESTADO DE MINAS GERAIS

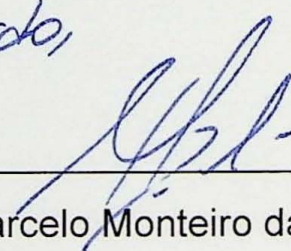
TRABALHO DE FORMATURA

TF-2011 / 12



  
Dhaniel Antunes de Carvalho

*De acordo,*

  
Orientador: Prof. Dr. Marcelo Monteiro da Rocha

DEDALUS - Acervo - IGC



30900030269

SÃO PAULO

2011

TF  
C 331  
DA.a

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

TRABALHO DE FORMATURA



TF 2011/12

*[Handwritten signature]*

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Moreira da Costa

*[Handwritten signature]*

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Moreira da Costa

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS



## AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer à minha família, mãe, pai, irmão e avó que são os pilares da minha vida, sem vocês eu não teria alcançado um por cento de tudo que conquistei.

Gostaria de agradecer à Votorantim Metais e ao geólogo José Antônio Lopes pelos dados e materiais concedidos, sem essa parceria o projeto não poderia ser concebido.

Agradeço ao professor Marcelo Monteiro da Rocha pela orientação, pela confiança no trabalho e pelo conhecimento adquirido com as discussões e etapas do projeto.

Agradeço à Geovariâncas que por meio de seu Programa Acadêmico possibilitou a utilização do Isatis no Instituto de Geociências da USP.

Aos amigos da Exploração Mineral da Votorantim Metais, Jorge Basílio (Fofão), Letícia Gameiro (Nojenta), Laércio Bertossi e Gabriel Zorzi (Jundiá) pelo atendimento às minhas intermináveis dúvidas em modelagem e geoestatística, obrigado pela força!

Ao geólogo Fernão Paes de Barros pelas oportunidades oferecidas e todos os ensinamentos em geologia, muito obrigado.

Em relação aos irmãos que adquiri na República Conglomerado: muito obrigado ao Denis Kenji (Fyma) e Luiz Pobreza (Pixirica) pelas madrugadas em claro, em vésperas de prova, montando listas de músicas clássicas dos anos 80 e horas perdidas “correndo da polícia com os *homies*”! Obrigado ao Lucas Blanes (Catu) pelos campeonatos de pebolim (você joga bem mais ou menos) e o meu não obrigado pelos roncos que não deixava a galera dormir. Ao Intimus (Negro) Geo, também conhecido como Eldon Alves, pela boleragem e “*no limits*” constante, e pelo bom humor matinal que alegrava a todos os moradores, muito obrigado! Agradeço ao Mateus Rossi pela calma geral nos jogos do Cruzeiro e o vício em blogs informativos que adicionam muito conteúdo à minha vida. E finalmente o obrigado ao nosso amigo Cleiton Graal, meio cabeça dura, sempre com um posicionamento firme e por vezes estagnado ao conforto da república.

Gostaria de agradecer também à Jacqueline Neitzel (Lolita), BFF desde o terceiro ano; Caio Arthur (Fofona), “meu primeiro amigo futuro professor da USP”; Vinícius Zacatei (Sinistro), o típico corinthiano mala; Mathias Hueck (Emília), “você já ouviu aquela música indiana cantada por esquimós albinos?”; Adinan Jarouche (Placenta) e Lyvia Sousa (Saravá), meus grandes parceiros de grupo, vocês fazem parte do resto da minha vida, amigos de verdade, conto com vocês daqui para sempre.

Obrigado também por coisa alguma durante todos esses anos ao Fernando Uchidobola (Bobo), o rapaz Marcel Müller (Sloty) e o barril André Polistchuck (Pau-M), vocês não valem nada. Agradeço também a todos da Turma 50!

Também aos amigos Renato Watanabe, Ygor Morooka, Fernando Blanco, Gabriel Barbosa (Mussum), Paula Kanashiro, Ana Carolina do Amaral, Henrique Zendron, Kaio Sganzerla e Débora Perroni que apesar da distância recente, não esqueço nunca, grandes amigos!

E, finalmente, agradeço à minha namorada Ana Paula Chiquini pela pessoa maravilhosa que é, e por todas as experiências, aprendizados e amor compartilhado durante todo o tempo.

## RESUMO

Uma etapa muito importante em um empreendimento mineiro é a avaliação do depósito mineral. A avaliação dos recursos/reservas minerais consiste na modelagem tridimensional, estimativas e classificação do minério. O processo tem início com a revisão bibliográfica da região e amostragem do alvo, que deve ser adequada para a mineralização em questão, conter dados geológicos e análises químicas. Com o banco de dados pronto, é realizada a validação desses dados, a modelagem geológica, a análise estatística, a análise geoestatística, validação cruzada e estimativas.

Trata-se de um depósito de Zn e Pb localizado no noroeste de Minas Gerais, inserido no contexto geotectônico da Faixa Brasília e hospedado em brechas intraformacionais dolomíticas do Grupo Vazante. As mineralizações apresentam-se na forma filoneana e controlada por falhas.

Ao término do trabalho, os resultados foram um banco de dados consolidado e um modelo geológico tridimensional do depósito. A estatística básica, bem como histogramas de frequência, também obtidos nessa pesquisa forneceram informações importantes para a elaboração dos variogramas experimentais, para os quais foi ajustado o modelo teórico de variograma. Por fim, obteve-se o modelo de blocos regularizados e modelos com subcélulas obedecendo aos limites da modelagem.

Os recursos consolidados totalizam 820 kt @ 10,87% de Zn e 2,03% de Pb para o minério oxidado, e 962 kt @ 4,75% de Zn e 0,54% de Pb para o minério sulfetado. Devido ao grau de conhecimento, relacionado ao número de amostras e qualidade das análises, os recursos não foram classificados (medido, indicado e inferido). Apesar disso, o depósito apresenta alto potencial e sugere-se que seja realizado um adensamento na amostragem e controle de qualidade nas análises seguintes, que resultaria em uma modelagem mais detalhada e estimativas embasadas em uma maior quantidade de informação.

Palavras-chave: geoestatística, modelagem, avaliação de depósitos, zinco, chumbo.

## ABSTRACT

A very important step in a mining project is to evaluate the mineral deposit. The evaluation of mineral resources/reserves is the three-dimensional modeling, estimation and classification of ore. The process begins with a literature review and sampling of the target region, which should be adequate for the mineralization, containing data from geological and chemical analysis. With the database ready, starts the validation of these data, geological modeling, statistical analysis, geostatistical analysis, cross-validation and estimates.

This is a deposit of Zn and Pb located in the northwest of Minas Gerais, within the geotectonic context of the Brasilia Belt, the mineralization is hosted by intraformational dolomite breccias in Vazante Group. The mineralization is present in the form of lodes and controlled by faults.

Upon completion of the work, the results were a consolidated database and a three-dimensional geological model of the deposit. The basic statistics, frequency histograms, also obtained in this study, were used to create the experimental variograms and the theoretical variogram model. Finally, we obtained the regularized block models and models with subcells obeying the limits of modeling.

The consolidated resources amount to 820 kt @ 10.87% Zn and 2.03% for Pb in oxidized ore, and 962 kt @ 4.75% Zn and 0.54% for Pb in sulfide ore. Because of the information degree related to the number of samples and quality of analysis, the resources were not classified (measured, indicated and inferred). Nevertheless, the deposit has a high potential and it is suggested the infill on sampling grid and quality control in the following analysis, resulting in a more detailed modeling and estimation grounded in a greater amount of information.

Keywords: geostatistics, modeling, mineral evaluation, zinc, lead.

## ÍNDICE

<b>1.</b>	<b>Introdução.....</b>	<b>2</b>
<b>2.</b>	<b>Objetivos .....</b>	<b>4</b>
<b>3.</b>	<b>Revisão Bibliográfica .....</b>	<b>4</b>
<b>3.1</b>	<b>Geologia Regional e do Depósito .....</b>	<b>4</b>
<b>3.2</b>	<b>Amostragem .....</b>	<b>6</b>
<b>3.3</b>	<b>Validação dos Dados .....</b>	<b>6</b>
<b>3.4</b>	<b>Análise Estatística .....</b>	<b>6</b>
<b>3.5</b>	<b>Modelagem Geológica 3D.....</b>	<b>9</b>
<b>3.6</b>	<b>Variáveis Regionalizadas.....</b>	<b>10</b>
<b>3.7</b>	<b>Análise Geoestatística .....</b>	<b>11</b>
<b>3.8</b>	<b>Validação Cruzada.....</b>	<b>13</b>
<b>3.9</b>	<b>Krigagem Ordinária .....</b>	<b>14</b>
<b>4.</b>	<b>Materiais e Métodos.....</b>	<b>15</b>
<b>5.</b>	<b>Desenvolvimento do Trabalho.....</b>	<b>15</b>
<b>6.</b>	<b>Resultados Obtidos.....</b>	<b>18</b>
<b>6.1</b>	<b>Validação dos Dados .....</b>	<b>18</b>
<b>6.2</b>	<b>Modelagem Geológica 3D.....</b>	<b>20</b>
<b>6.3</b>	<b>Análise Estatística .....</b>	<b>21</b>
<b>6.4</b>	<b>Análise Geoestatística .....</b>	<b>25</b>
<b>6.5</b>	<b>Modelo de Blocos .....</b>	<b>31</b>
<b>6.6</b>	<b>Validação Cruzada.....</b>	<b>33</b>
<b>6.7</b>	<b>Krigagem Ordinária .....</b>	<b>34</b>
<b>7.</b>	<b>Discussão dos Resultados.....</b>	<b>36</b>
<b>8.</b>	<b>Conclusões.....</b>	<b>42</b>
<b>9.</b>	<b>Referências Bibliográficas .....</b>	<b>44</b>

## 1. Introdução

A avaliação de recursos/reservas de depósitos minerais é muito complexa, portanto, é preciso ter o planejamento adequado da amostragem na área selecionada para a pesquisa mineral, levando em consideração uma série de conceitos como, por exemplo, o modelo metalogenético e o controle estrutural da mineralização. Tendo a amostragem definida e executada é possível iniciar a análise estatística e geoestatística, visando como resultado, a delimitação do corpo mineral, a modelagem tridimensional do depósito, definindo geometria, espessuras e orientação dos corpos de minério.

Assim, é possível realizar a avaliação de forma consistente, com cálculos de recursos/reservas minerais precisos, definindo teores e tonelagens com a confiabilidade necessária para a análise e realização de empreendimentos mineiros.

Este trabalho será desenvolvido em um depósito de Zn e Pb que fica localizado na porção NW de Minas Gerais (Figura 1) fazendo parte do maior distrito zincífero do país, que engloba os depósitos de Vazante, Morro Agudo e Fagundes. A região situa-se a oeste do Cráton do São Francisco, na porção externa do contexto da Faixa de Dobramentos Brasília (Almeida, 1967).

As porções mineralizadas são controladas por falhamentos e zonas de cisalhamento que permitiram a circulação dos fluidos hidrotermais, formando depósitos de caráter sin a tardi- diagenéticos e epigenéticos, com diferenças mineralógicas marcantes (Monteiro, 2002).

Os depósitos de metais-base, como o de zinco e chumbo da região, são de extrema importância para a indústria, mercado e economia brasileira apresentando grande potencialidade em termos de reservas minerais. Por isso, são necessárias avaliações detalhadas dos recursos minerais.

O objetivo principal deste trabalho é a avaliação dos recursos minerais do depósito, e para tal será realizada a análise estatística e geoestatística, e serão levadas em consideração todas as variáveis e interpretações geológicas, incertezas, riscos e aproximações inerentes à complexidade das mineralizações encontradas no Grupo Vazante e os eventos hidrotermais que ocorreram na região.

Como parte da avaliação dos recursos minerais será realizada a modelagem tridimensional da geologia, tendo como base os dados de furos de sondas realizados na área para pesquisa mineral. Ainda com base nestas informações, os teores dos elementos de interesse serão estimados e, então, ambos os resultados serão integrados com a finalidade de aumentar a confiabilidade da avaliação. Os softwares específicos utilizados para a execução dos cálculos e modelagem serão o Isatis® e o Datamine®.

A necessidade de aplicações de métodos computacionais na indústria mineral aumentou significativamente a qualidade e quantidade de soluções para problemas geológicos diversos. Através de ferramentas de análise, como a modelagem tridimensional e técnicas geoestatísticas, é possível caracterizar o depósito mineral, com visualização 3D das principais feições geológicas e a distribuição do minério estudado, o que é de grande interesse e valor para as empresas mineradoras que buscam maximizar o aproveitamento dos recursos minerais, adicionando-se ainda alto grau de confiabilidade nos valores de teores e volume (tonelagem) de minério calculados.

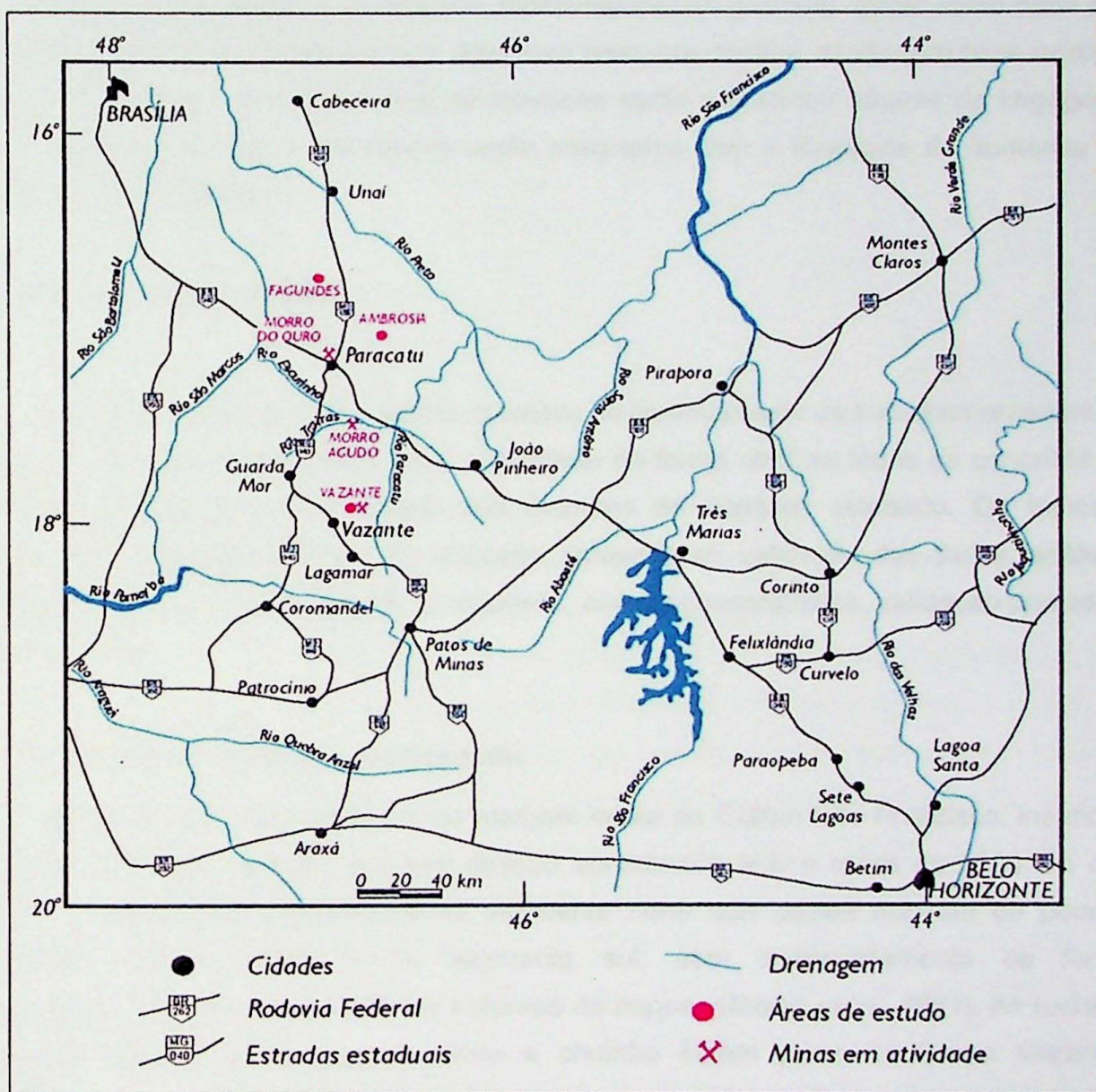


Figura 1: Mapa de localização dos principais depósitos e da área estudada (Monteiro, 2002).

## 2. Objetivos

O objetivo principal do trabalho é a realização da avaliação dos recursos minerais do depósito de Ambrósia, com análise estatística e geoestatística, levando em consideração todas as variáveis e interpretações geológicas, incertezas, riscos e aproximações inerentes à complexidade das mineralizações encontradas no Grupo Vazante e os eventos geológicos que ocorreram na região.

Para isso será utilizada a modelagem tridimensional da geologia, tendo como base os dados de furos de sondas realizados na área para pesquisa mineral. Ainda com base nestas informações, os teores dos elementos de interesse serão estimados através da krigagem ordinária e, então, ambos os resultados serão integrados com a finalidade de aumentar a confiabilidade da avaliação.

## 3. Revisão Bibliográfica

A revisão bibliográfica deste projeto consistiu no levantamento de trabalhos anteriores, relacionados aos temas aqui abordados, resumindo de forma objetiva todos os conceitos e procedimentos utilizados na avaliação dos recursos do depósito estudado. Os tópicos revisados são: geologia regional e do depósito, amostragem, validação dos dados, análise estatística, modelagem geológica 3D do depósito, análise geoestatística, validação cruzada, krigagem ordinária.

### 3.1 Geologia Regional e do Depósito

A região do depósito localiza-se na margem oeste do Cráton São Francisco, inserida no contexto da Faixa Brasília, que tem direção aproximada N-S e cerca de 1000 km de extensão. A Faixa pode ser dividida no segmento norte que possui nenhum ou pouco metamorfismo (xisto verde) e no segmento sul, com desenvolvimento de forte metamorfismo, grandes dobramentos e sistemas de *nappes* (Marini *et al.*, 1981). As rochas hospedeiras das mineralizações de zinco e chumbo fazem parte do Grupo Vazante (Dardenne *et al.*, 1998), que representa uma espessa sequência metassedimentar constituída por rochas pelíticas e carbonáticas, em uma faixa N-S de aproximadamente 200 km de extensão.

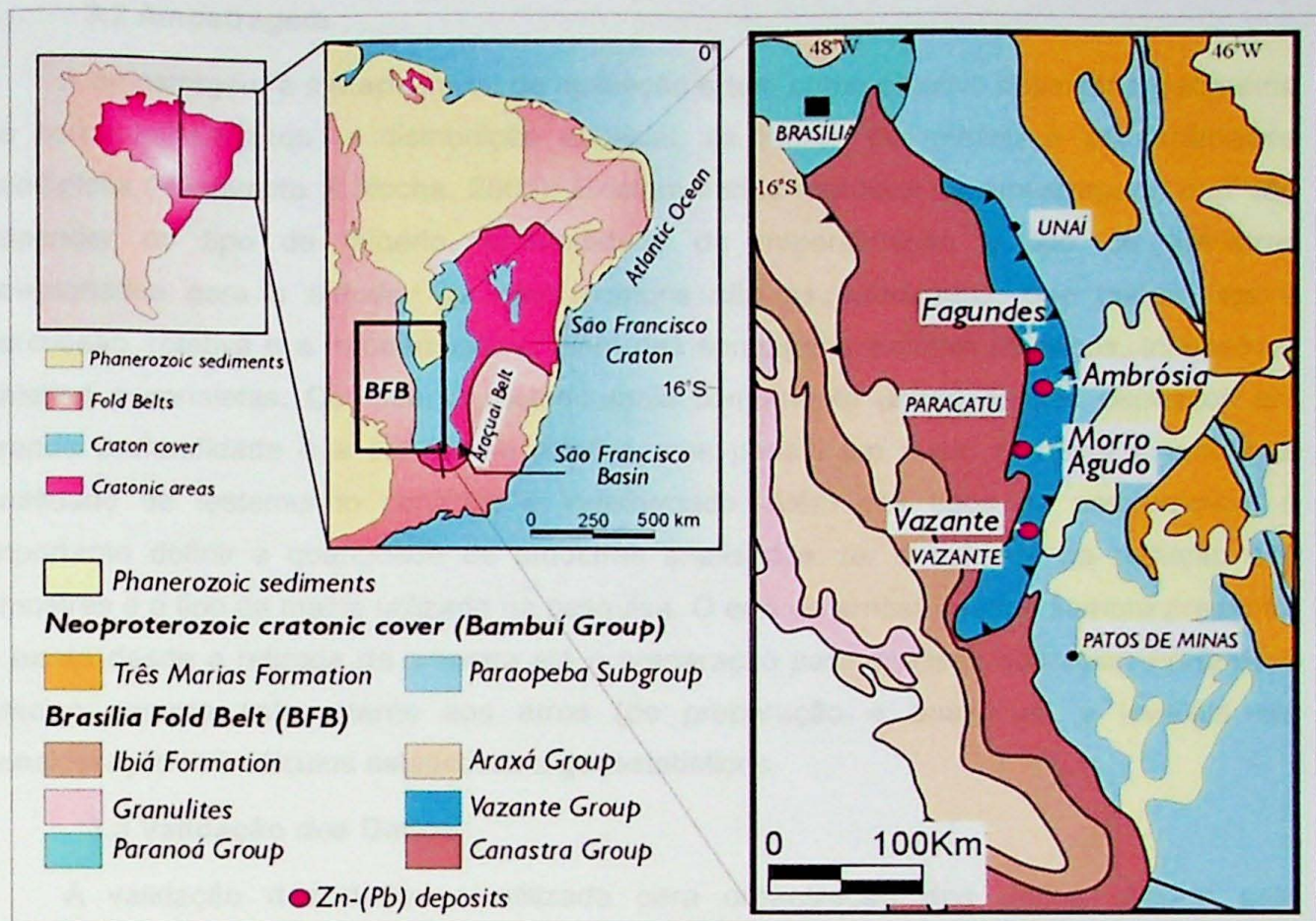


Figura 2: Mapa geológico regional do depósito estudado (Dardenne, 2000).

O depósito tem sua mineralização de zinco controlada por uma zona de falha de alto ângulo de direção N30W, que intercepta o Membro Morro do Pinheiro Superior e Pamplona Inferior. O primeiro é constituído por dolomitos cinza escuros com estruturas estromatolíticas planares. Apesar da superposição de processos de alteração hidrotermal, relacionados à zona de falha, são observadas estruturas sedimentares e diagenéticas; além disso, ocorrem piratas disseminadas nos sedimentos ou em venulações posteriores à cimentação (Monteiro, 2002). O Membro Pamplona Inferior é constituído por ardósias e filitos carbonosos e rítmicos, que gradam para metarenitos, metassiltitos, metamargas e dolomitos argilosos. As rochas hospedeiras da mineralização são em geral dolomíticas e intensamente brechadas. A mineralização é predominantemente filoneana epigenética, associada aos dolomitos brechados, que provavelmente pertencem ao Membro Pamplona Superior e foram tectonicamente imbricados a filitos pretos e ardósias do Membro Pamplona Inferior, na zona de falha (Monteiro, 2002). Essa mineralização pode ser dividida em três estágios: Pré-mineralização (diagenética, com dolomita e pirita euhédrica), Estágio Principal (estruturas rúpteis-dúcteis, com pirita, esfalerita e galena mobilizadas) e Estágio Tardio (estruturas rúpteis, com dolomita, esfalerita e galena tardias) (Monteiro, 2002).

### **3.2 Amostragem**

A amostragem é a etapa inicial da avaliação e tem como objetivo delimitar a geometria do corpo mineralizado, a distribuição espacial, os teores do minério e os parâmetros geológicos (Yamamoto & Rocha, 2001). Existem vários métodos de amostragem, que vão depender do tipo de minério, profundidade da mineralização e tipo de amostras selecionadas para o estudo. Os mais comuns são as sondagens, que podem ser à percussão, rotativa e a rotopercussiva, além das sondagens existem os poços, trincheiras, galerias e canaletas. Contudo, o método mais comumente usado nesses depósitos em grande profundidade é a sondagem rotativa, que possui um custo razoável e uma boa qualidade de testemunho contínuo e indeformado. Além dos tipos de amostragem, é importante definir a quantidade de amostras analisadas, ter o cuidado na redução das amostras e o tipo de malha utilizado na pesquisa. O erro de amostragem é sempre presente, e existe desde a retirada da amostra até a preparação para análises químicas. Portanto é preciso sempre estar atento aos erros (de preparação e analíticos) e levá-los em consideração nos cálculos estatísticos e geoestatísticos.

### **3.3 Validação dos Dados**

A validação dos dados é utilizada para organização dos dados obtidos pela amostragem. É necessário verificar a consistência dos valores encontrados na base de dados, seguindo alguns passos básicos, como, por exemplo, certificar se a localização das amostras é correta, pois isso reflete na geometria interpretada do depósito e nos volumes calculados; verificar se a densidade dos dados é suficiente para garantir a continuidade da mineralização; analisar a recuperação do testemunho e qualidade das análises químicas, verificando se estas são precisas ou imprecisas e identificar o tipo de erro se possível (Handley *et al.*, 1987). Além disso, deve-se localizar possíveis lacunas/sobreposições (*gaps/overlays*) de descrição litológica e análises químicas, verificar as profundidades, desvios das sondagens, amostras e furos duplicados, entre outras fontes de erros no banco de dados, que podem comprometer a qualidade das etapas seguintes na avaliação dos recursos.

### **3.4 Análise Estatística**

A análise estatística consiste em caracterizar e descrever estatisticamente as distribuições dos dados através de gráficos e de medidas descritivas (Yamamoto, Bettencourt & Montanheiro 2001). Essa análise inicia-se com a estatística descritiva que caracteriza numericamente os dados. As estatísticas descritivas normalmente calculadas

são média, moda, mediana, variância, desvio padrão e coeficiente de variação. A média das amostras é calculada por:

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

A moda é o valor, ou valores, mais frequentes observados em uma população. As séries podem ser modais (uma moda), bimodais (dois valores modais), polimodais (mais de dois valores modais) ou amodais (sem moda).

A mediana é o número correspondente a 50% da distribuição dos valores. No caso de números ímpares de valores, a mediana corresponde ao valor central. Já no caso de números pares, a mediana corresponde a media dos dois valores centrais.

A variância de uma variável aleatória é uma medida da dispersão estatística, indicando o quanto o valor distancia-se da média. A variância é calculada por:

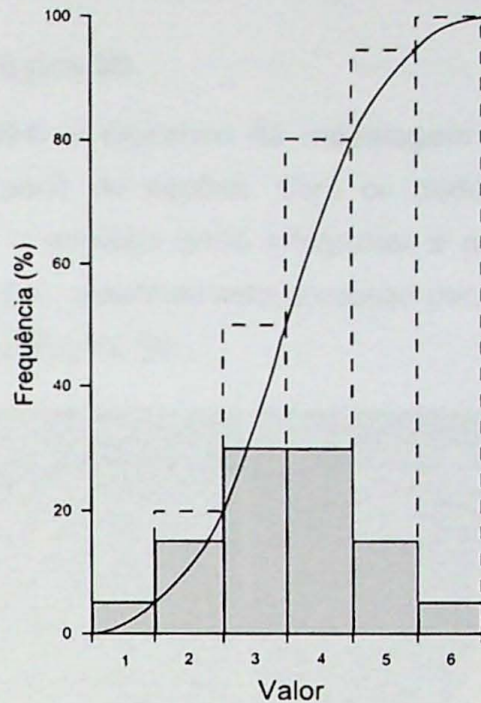
$$S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2$$

O desvio padrão é a medida mais comum da dispersão estatística, e é definido como a raiz quadrada da variância. Dessa forma, o desvio padrão é uma medida de dispersão não negativa e ainda possui a mesma unidade dos dados fornecidos inicialmente. Segue a fórmula:

$$S = \sqrt{S^2}$$

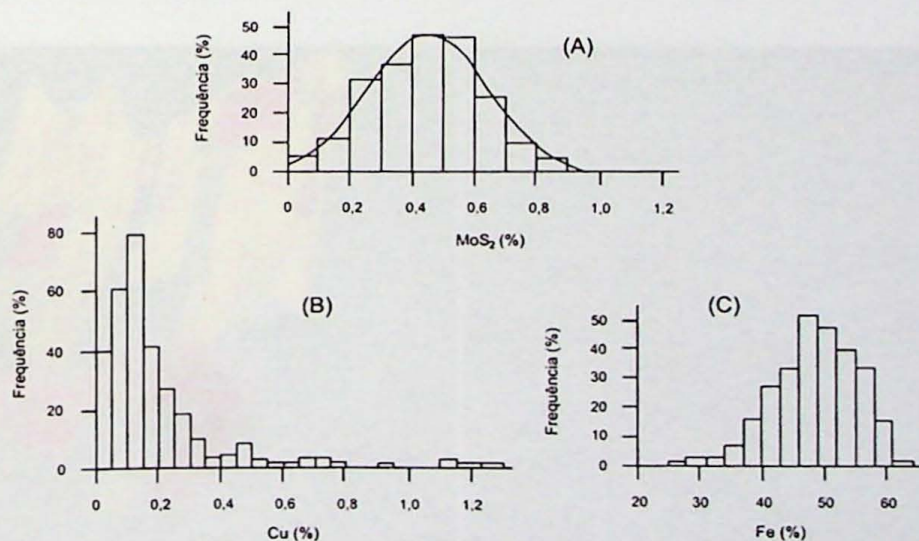
O coeficiente de variação é obtido pela divisão do desvio padrão pela média, e por ser uma medida adimensional é utilizado para comparar a dispersão relativa de valores em torno da média em diferentes distribuições. Por esse motivo é utilizado para comparar e classificar depósitos minerais segundo sua variabilidade natural (Yamamoto, Bettencourt & Montanheiro 2001).

Com o estudo das distribuições de frequências, é possível descrever o comportamento das unidades de uma população sobre o intervalo amostrado, podendo ter caráter simples ou acumulada (Figura 3) e caracterizar distribuições normais ou lognormais.



**Figura 3:** Ilustração mostrando a distribuição simples (histograma preenchido) e acumulada (histograma pontilhado e curva suavizada) (Modificado de Sinclair & Blackwell, 2002).

É possível caracterizar ainda as distribuições de acordo com a assimetria, que pode ser normal, positiva ou negativa (Figura 4). A assimetria negativa ocorre quando a calda da distribuição está à esquerda da média, e é característica de depósitos cuja frequência de teores altos é maior que a de teores baixos como, por exemplo, depósitos de ferro (Fe analisado) e de calcário (CaO analisado). No caso da assimetria positiva a calda está à direita, e é característica de depósitos de metais raros como Au, Cu, Zn, EGP, entre outros, que podem em muitos casos serem representadas por distribuições lognormais (Yamamoto, Bettencourt & Montanheiro 2001).



**Figura 4:** Exemplos de dados de furos de sonda representados em histogramas: (A) aproximadamente simétrico de 224 valores de MoS<sub>2</sub>, assimétrico negativo para dados de Fe de 277 amostras e assimétrico positivo de 309 análises para Cu (Extraído do de Sinclair & Blackwell, 2002).

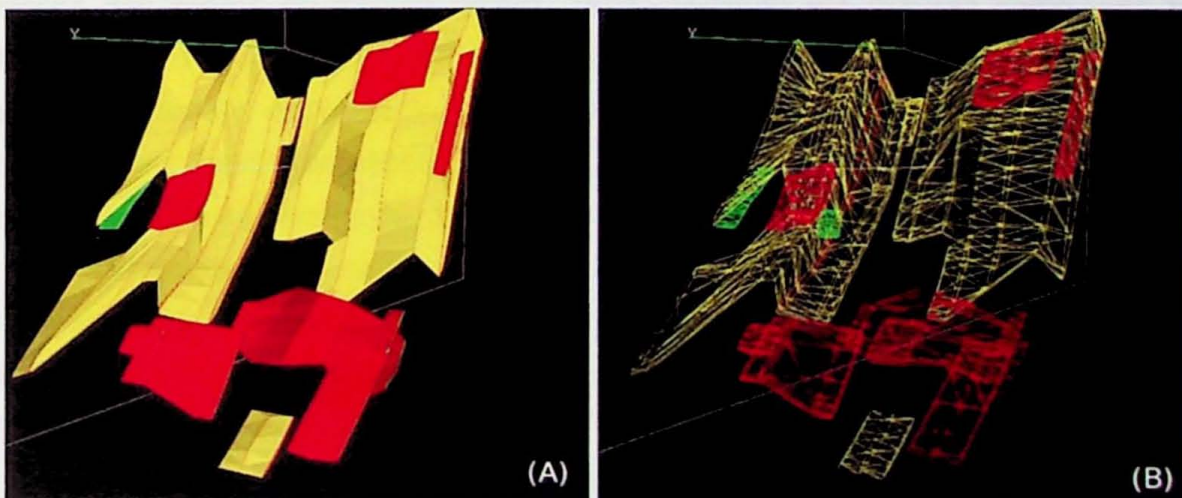
### 3.5 Modelagem Geológica 3D

Segundo Houlding (1994) o processo da modelagem geológica 3D é baseado na interpretação dos dados a partir de seções. Com os dados projetados corretamente e representados graficamente, o geólogo pode interpretar a geologia do corpo mineral em cada plano particular (Figura 5a), repetindo este processo para todas as seções, definindo a geologia para cada uma delas (Figura 5b).



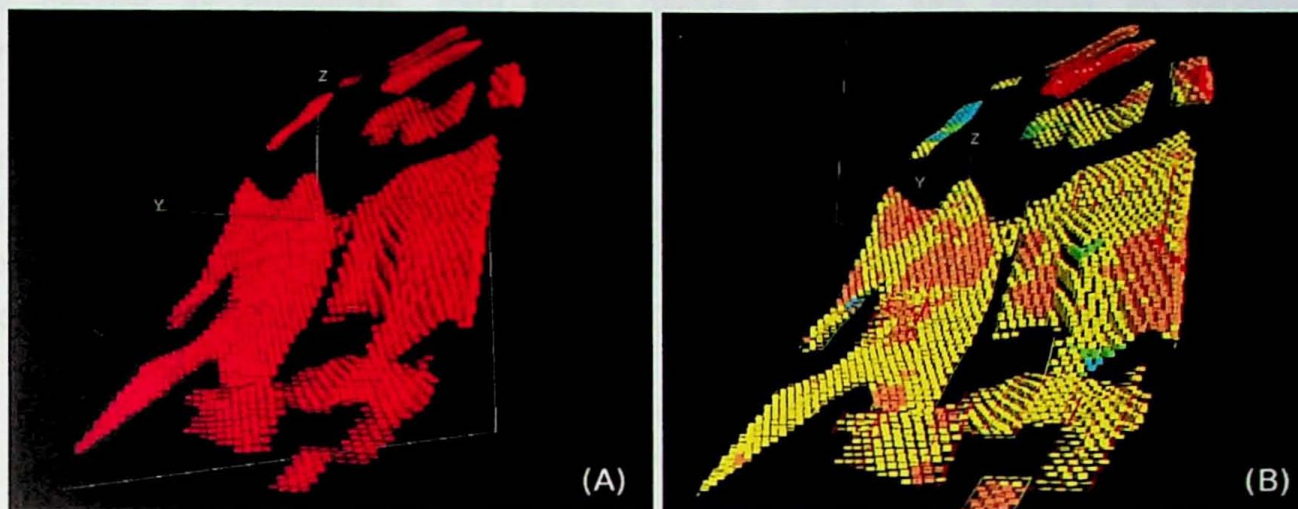
**Figura 5:** Modelagem geológica do corpo mineralizado a partir da interpretação de seções verticais. Em (A) é possível observar a interpretação de uma seção particular, e em (B) todo o depósito está interpretado, pronto para formar o sólido do minério.

Dessa forma, é possível iniciar a modelagem geométrica do depósito a partir de *strings* que são interligadas por *wireframes* que conectam as seções geológicas por algoritmos de triangulação automática de poligonais, que tem como objetivo produzir uma forma irregular constituída por uma malha de triângulos (Figura 6). Com o *wireframe* definido, os volumes do depósito podem ser calculados.



**Figura 6:** *Wireframes* dos corpos mineralizados gerados pela conexão das *strings* entre as seções interpretadas. Em (A) os sólidos geométricos e em (B) o mesmo sólido com a triangulação poligonal evidenciada.

Após isso, o modelo de blocos é criado (Figura 7a), permitindo representar várias características como teores, litologia e densidade, divididas em blocos ou células tridimensionais. A modelagem de teores é feita dessa forma, atribuindo os valores de cada bloco a partir dos métodos de interpolação/estimativa (Figura 7b).



**Figura 7:** Modelo de blocos do depósito mineral. Em (A) os *wireframes* foram preenchidos por blocos, e em (B) os teores foram estimados e atribuídos ao modelo.

Com a modelagem geológica e de teores definidos, é possível integrar essas informações formando um modelo final otimizado do depósito que leva em consideração não apenas as estimativas computacionais, mas também toda a interpretação geológica.

### 3.6 Variáveis Regionalizadas

As variáveis regionalizadas são variáveis aleatórias que dependem da sua posição no espaço, referenciadas geograficamente, introduzidas para descrever quantitativamente as variações dos corpos de minério (Royle, 1979) podendo ser definida como uma função matemática com continuidade e variando de ponto a ponto. Essa função é chamada de função variograma e descreve o comportamento espacial da variável regionalizada. Para isso, deve ser assumida Hipótese Intrínseca, que garante esse comportamento para distâncias iguais e na mesma direção, ou seja, intrínseco da regionalização.

As variáveis regionalizadas possuem algumas características definidas por Bubeniceck & Haas (1969), sendo elas localização geográfica, suporte (unidade amostral básica como área ou volume), continuidade (variância espacial), anisotropias e fenômenos de transição.

### 3.7 Análise Geoestatística

A análise geoestatística é uma etapa fundamental na avaliação de recursos/reservas minerais, já que é a partir desta etapa que se obtém o modelo teórico de variograma usado na krigagem, a fim de reconhecer o comportamento espacial dos teores no depósito mineral e calcular as estimativas. Para esses cálculos iniciais são usadas as variáveis regionalizadas.

O variograma é o instrumento capaz de descrever quantitativamente a variação no espaço de um fenômeno regionalizado (Huijbregts, 1975), é calculado a partir da comparação de pares de pontos consecutivos em uma determinada direção analisada. Segundo Journel & Huijbregts (1978) a função semivariograma, que é comumente usada e definida como a metade da função variograma, pode ser obtida pela aproximação:

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

onde  $\gamma(h)$  é a função semivariograma,  $Z(x)$  é o valor variável no ponto  $x$  e  $Z(x+h)$  a mesma variável, porém no ponto  $x+h$ .

O gráfico apresentado tem a variância calculada par a par, segundo a fórmula acima, que é plotada em função da distância  $h$  (Figura 8a). Esses pontos plotados representam o comportamento e variação do fenômeno estudado, e para que se obtenha qualquer valor de  $\gamma(h)$ , é necessário ajustar o modelo teórico de variograma (Figura 8b), que será utilizado na krigagem, ou em outro método de estimativa.

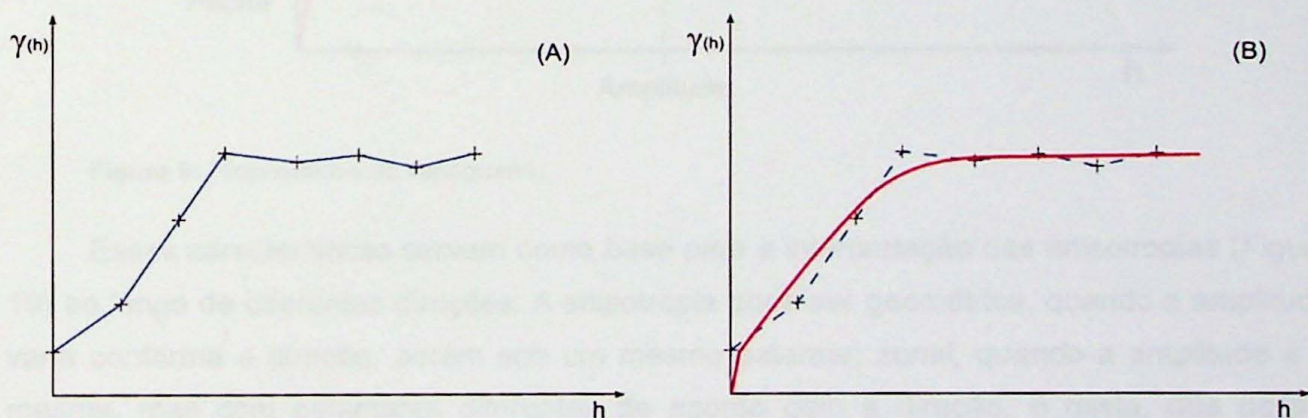


Figura 8: Variograma experimental com os pontos plotados (A) e modelo teórico de variograma ajustado (B).

O variograma deve ser estruturado para que a estimativa por krigagem possa ser realizada, portanto é recomendável, sempre que possível, efetuar a análise exploratória com base na interpretação geológica de dados de campo, como, por exemplo, direção de eixos de dobras, acamamentos sedimentares, planos de falhas, foliação e veios de quartzo.

As propriedades do variograma com patamar, demonstradas na Figura 9, são:

- **Amplitude:** É a distância que separa o campo estruturado do campo aleatório, ou seja, é o intervalo máximo na qual as amostras têm correlação entre si;
- **Patamar:** É a variância máxima de um variograma (quando se trata de um fenômeno estacionário). Tem início a partir da amplitude, na qual o variograma estabiliza-se;
- **Efeito Pepita:** É uma variância próxima a distâncias nulas, dada pela variabilidade natural do depósito ou erros durante amostragem/tratamento dos dados.
- **Variância Espacial:** É a diferença entre a variância máxima (patamar) e o efeito pepita.

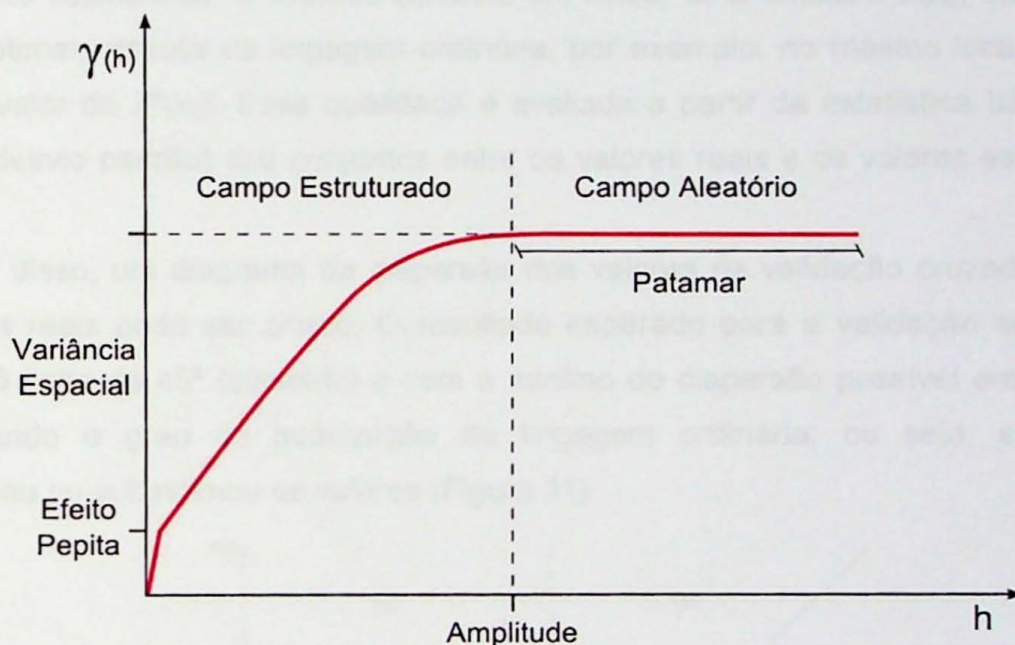


Figura 9: Propriedades do variograma.

Essas características servem como base para a interpretação das anisotropias (Figura 10) ao longo de diferentes direções. A anisotropia pode ser geométrica, quando a amplitude varia conforme a direção, porém sob um mesmo patamar; zonal, quando a amplitude é a mesma, mas com patamares diferentes de acordo com a direção; e mista, que possui amplitudes e patamares diferentes para cada direção.

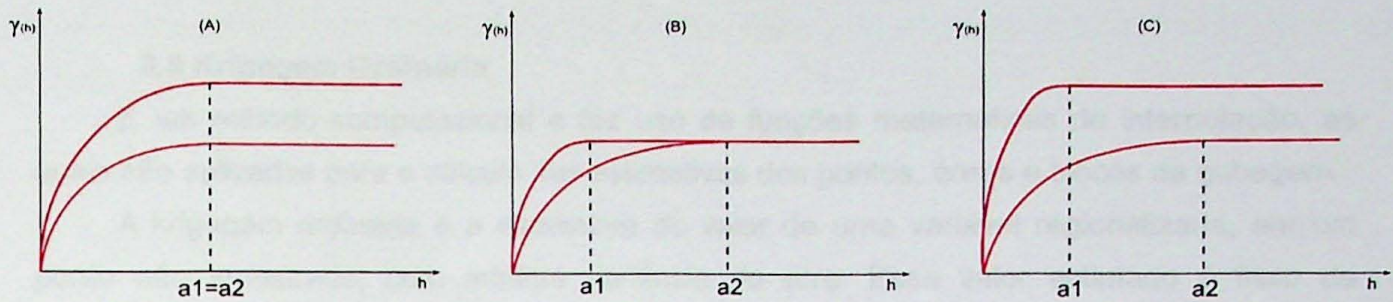


Figura 10: Tipos de anisotropias dos fenômenos, sendo elas: zonal (a), geométrica (b) e mista (c).

### 3.8 Validação Cruzada

O objetivo da validação cruzada é aferir a qualidade do modelo de variograma ajustado para os dados em estudo, além de definir os parâmetros de vizinhança e o erro associado às estimativas. O método consiste em retirar uma amostra  $Z(x_0)$  do conjunto de dados e estimar, através da krigagem ordinária, por exemplo, no mesmo local da amostra retirada o valor de  $Z^*(x_0)$ . Essa qualidade é avaliada a partir da estatística básica (média, variância, desvio padrão) dos conjuntos entre os valores reais e os valores estimados pela validação.

Além disso, um diagrama de dispersão dos valores da validação cruzada em função dos valores reais pode ser criado. O resultado esperado para a validação seriam pontos alinhados à linha de  $45^\circ$  (bissetriz) e com o mínimo de dispersão possível em torno dessa reta avaliando o grau de suavização da krigagem ordinária, ou seja, se o método superestimou ou subestimou os valores (Figura 11).

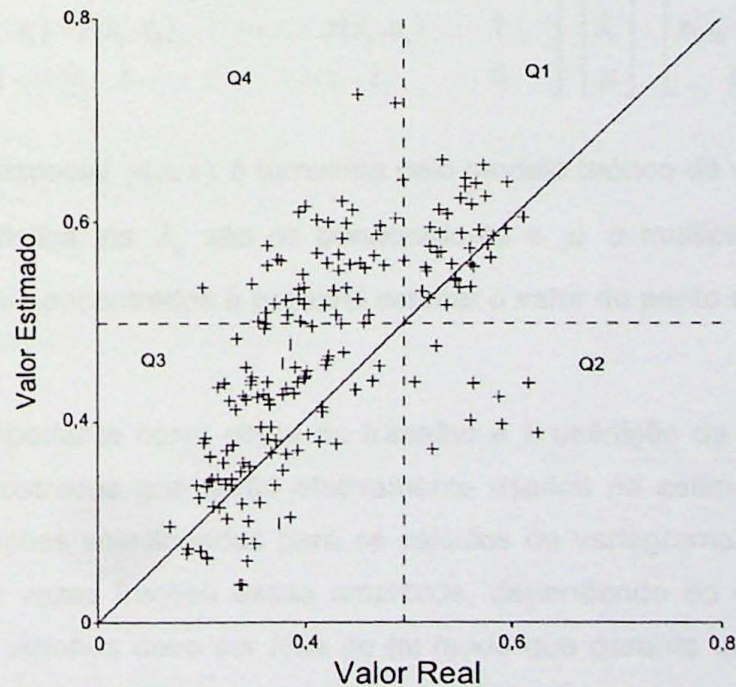


Figura 11: Exemplo da aplicação de um diagrama de dispersão na validação cruzada. De modo rápido nota-se que no geral os valores estão superestimados e que os valores nos quadrantes Q1 e Q3 estão melhores estimados dos que os dos quadrantes Q2 e Q4, que foram subestimados e superestimados, respectivamente.

### 3.9 Krigagem Ordinária

É um método computacional e faz uso de funções matemáticas de interpolação, as quais são aplicadas para o cálculo das estimativas dos pontos, áreas e blocos de cubagem.

A krigagem ordinária é a estimativa do valor de uma variável regionalizada, em um ponto não amostrado, com mínima variância do erro. Esse valor estimado é fruto da ponderação de amostras selecionadas na vizinhança do ponto desconhecido. O estimador da krigagem ordinária é dado por:

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

no qual  $Z_{KO}^*(x_0)$  é o valor estimado no ponto  $x_0$ ,  $\lambda_i$  é o ponderador da  $i$ -ésima amostra,  $n$  é o número de amostras selecionadas e  $z(x_i)$  é o valor da variável regionalizada da vizinhança, a  $i$ -ésima amostra. Para que não ocorra viés é necessário que a soma dos ponderadores seja igual a um, como segue:

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

É possível representar as equações de krigagem como uma matriz, conforme:

$$\begin{bmatrix} \gamma(x_1, x_1) & \gamma(x_1, x_2) & \cdots & \gamma(x_1, x_n) & 1 \\ \gamma(x_2, x_1) & \gamma(x_2, x_2) & \cdots & \gamma(x_2, x_n) & 1 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ \gamma(x_n, x_1) & \gamma(x_n, x_2) & \cdots & \gamma(x_n, x_n) & 1 \\ 1 & 1 & & 1 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_n \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma(x_0 - x_1) \\ \gamma(x_0 - x_2) \\ \vdots \\ \gamma(x_0 - x_n) \\ 1 \end{bmatrix}$$

na qual a variância espacial  $\gamma(x, x)$  é fornecida pelo modelo teórico de variograma, ajustado na análise geoestatística, os  $\lambda_n$  são os ponderadores e  $\mu$  o multiplicador de Lagrange. Com os ponderadores encontrados é possível estimar o valor do ponto através do estimador da krigagem.

Uma tarefa importante nesta etapa do trabalho é a definição da vizinhança local, ou seja, os pontos amostrados que serão efetivamente usados na estimativa. Esta definição deve honrar as direções selecionadas para os cálculos do variograma, respeitar os limites da amplitude, e por vezes frações dessa amplitude, dependendo do caso. A escolha das amostras dos furos vizinhos deve ser feita de tal modo que garanta uma boa amostragem espacial, evitando agrupamentos e subconjuntos, que ocorrem geralmente com arranjos de busca aleatórios e semi-regulares (Yamamoto, 2001). Com isso, a vizinhança local é

usualmente configurada pelo critério dos pontos mais próximos, dividido em quadrantes ou octantes, por exemplo.

#### **4. Materiais e Métodos**

Os dados utilizados no projeto são baseados na descrição de furos de sonda, com todas as informações geológicas requeridas para a interpretação mais próxima o possível à realidade. As informações contidas no banco de dados são: coordenadas dos furos, profundidades, litologia, características de alteração e mineralização, estruturas, desvios dos furos e análises químicas para os elementos de interesse ao empreendimento mineiro.

O modelo geológico e o modelo de blocos do depósito foram criados no software Datamine®. A análise estatística, análise geoestatística, estimativa dos teores por krigagem ordinária e validação cruzada foram realizados no software Isatis®. Esses softwares foram utilizados nos computadores do Laboratório de Informática Geológica do Instituto de Geociências (LIG) da Universidade de São Paulo e nos computadores da Votorantim Metais S.A.

Os modelos geológicos, representativos dos corpos mineralizados, foram criados a partir da conexão de *strings* entre as seções, efetuada a partir de triangulação automática de poligonais. Os sólidos são preenchidos por blocos de dimensões compatíveis com a malha de amostragem e os teores estimados são atribuídos a eles.

Na análise estatística foi calculada a estatística descritiva e criados histogramas para evidenciar o comportamento dos depósitos do metal estudado. Na análise geoestatística foram calculados os variogramas experimentais para as direções preferenciais dos corpos de minério e ajustados os modelos teóricos de variograma, que foram utilizados para as estimativas dos teores a partir do método de krigagem ordinária.

#### **5. Desenvolvimento do Trabalho**

O projeto teve início com a revisão bibliográfica, que perdurou até outubro. Concomitantemente, o treinamento nos softwares Datamine® e Isatis® foi realizado e o Projeto Inicial foi elaborado com base na bibliografia disponível para o alvo selecionado.

Com o banco de dados cedido pela Votorantim Metais, foi possível efetuar a validação dos dados, que consistiu na correção de erros e incoerências da base de dados, iniciar a análise estatística com o cálculo das estatísticas descritivas e histogramas, e modelagem geológica, com a interpretação e definição dos corpos de minério.

Com essas etapas concluídas, os variogramas experimentais e modelos teóricos de variograma puderam ser calculados e ajustados para as variáveis Zn e Pb, na direção dos corpos mineralizados.

Criou-se o modelo de blocos em Datamine® e com dimensões de acordo com a malha de amostragem e exportado ao Isatis®, onde foi realizada a análise geoestatística e estimativa de teores.

Um aspecto interessante confrontado durante o trabalho está relacionado ao tratamento inicial dos dados como um único depósito “uniforme” sem separação desses dados em populações específicas. Ao efetuar a análise estatística e parte da análise geoestatística do banco de dados único foi possível observar gráficos com grau de correlação entre Zn e Pb muito baixo, com dispersões indicando possíveis populações diferenciadas e os histogramas não se mostravam representativos, conforme pode ser observado na Figura 12. Além disso, os variogramas experimentais não apresentavam uma estruturação evidente para ambas variáveis Zn e Pb, mesmo se calculado para as direções mais suscetíveis a alguma anisotropia e correlação de teores, como da foliação e falhamentos, ou até mesmo omnidirecional.

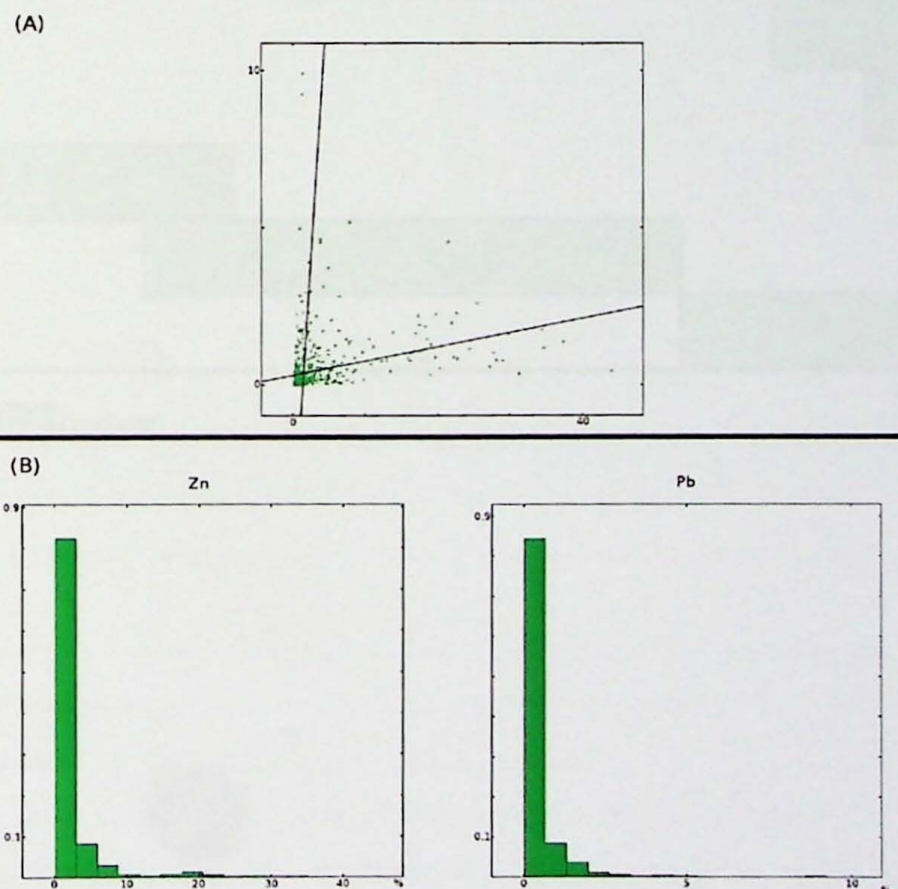
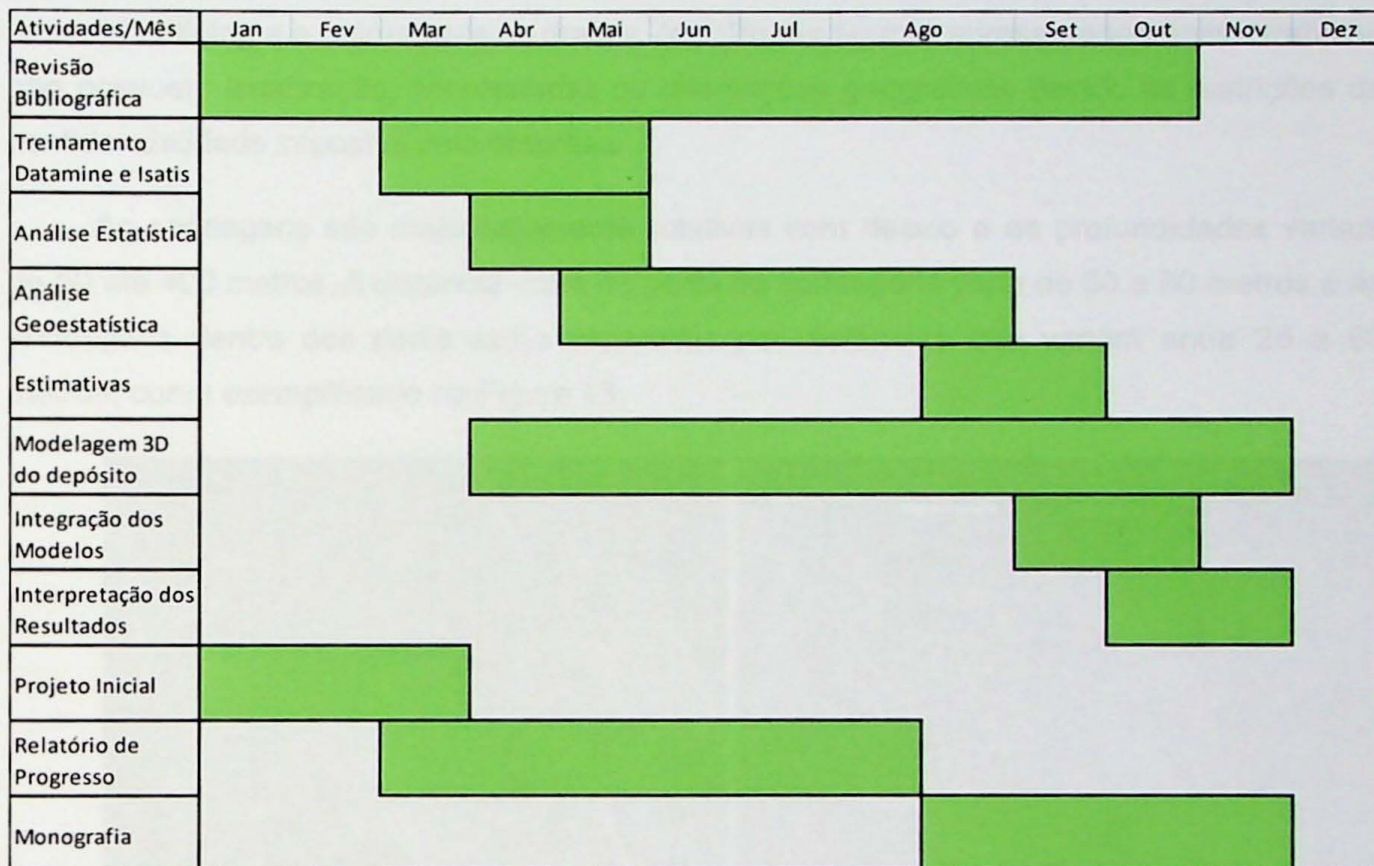



Figura 12 – (A) Gráfico de correlação entre Zn e Pb e (B) Histogramas de frequência de teores.

Frente a isso, foi realizada a separação dos dados em dois tipos de minérios diferentes: o oxidado e o sulfetado. Foi necessário refazer completamente a análise estatística e modelagem geológica. Inicialmente, na análise geoestatística, haviam sido

calculados variogramas experimentais para Zn e Pb. Após o novo tratamento, os variogramas foram recalculados em separadamente para minérios de Zn e Pb oxidados e sulfetados. Com a individualização dos variogramas experimentais, os resultados obtidos foram mais satisfatórios, comparados aos encontrados anteriormente. Segue o cronograma das atividades realizadas:

### Cronograma do Projeto



 Concluído

## 6. Resultados Obtidos

### 6.1 Validação dos Dados

O banco de dados foi disponibilizado pela Votorantim Metais e possui todas as informações necessárias para as análises, modelagem e avaliação propostas pelo projeto. Os dados existentes são: identificação do furo de sonda (BHID), coordenadas UTM (X e Y) e cota (Z), profundidade máxima (max\_depth), azimuth (BRG), mergulho (DIP), desvio do furo de sonda, litologia e teores para os metais Zn e Pb. As figuras apresentadas nesse trabalho não possuem localização, coordenadas ou orientações geográficas devido às restrições de confidencialidade impostas pela empresa.

As sondagens são majoritariamente rotativas com desvio e as profundidades variam de 50 até 400 metros. A distância entre os perfis de sondagens varia de 50 a 80 metros e as sondagens dentro dos perfis estão separadas por distâncias que variam entre 25 a 60 metros, como exemplificado na Figura 13.

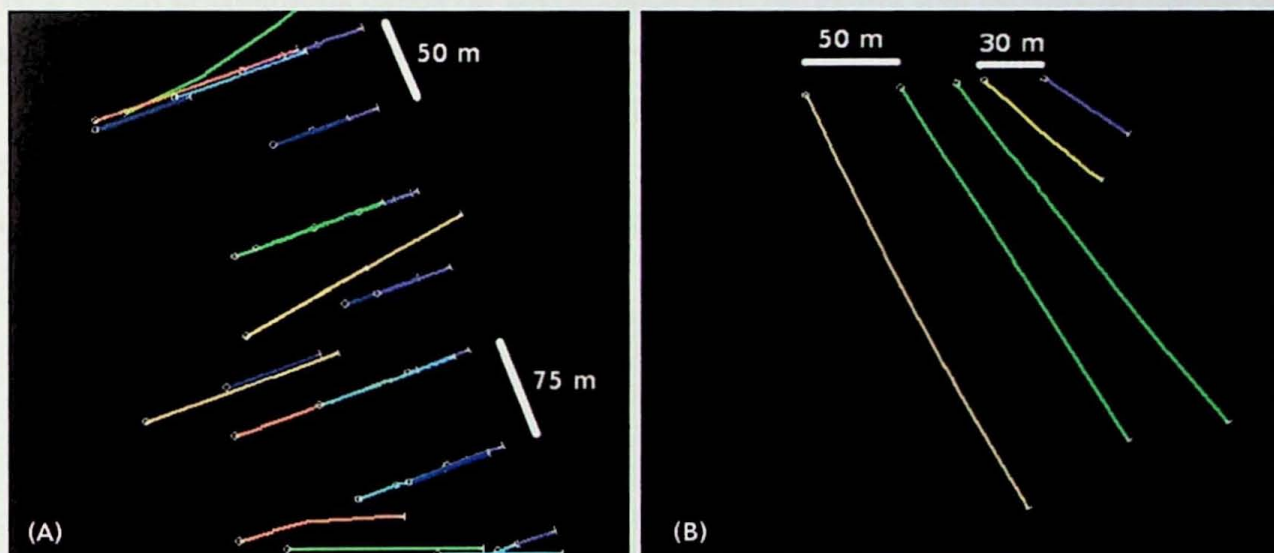


Figura 13 – Distâncias médias entre os perfis (A) e dos furos contidos em um perfil (B).

Na validação dos dados foi possível encontrar algumas incoerências no banco. Essas incoerências foram retiradas ou ajustadas com a finalidade de consolidar o banco de dados final, que será usado na modelagem, análises e estimativa.

Na tabela de litologia e teores foram encontrados muitas lacunas nas sondagens, que consistem em espaços vazios sem informação litológica e análise química para os metais estudados. As lacunas de teores foram corrigidos adicionando-se o trecho (de – até) ausente e atribuindo “ausência de valor” (N/A) a esses campos. Esse procedimento é importante para o reconhecimento do arquivo no Isatis®, já que, anteriormente à correção, dezenas de sondagens não foram regularizadas, e após a correção todas as sondagens

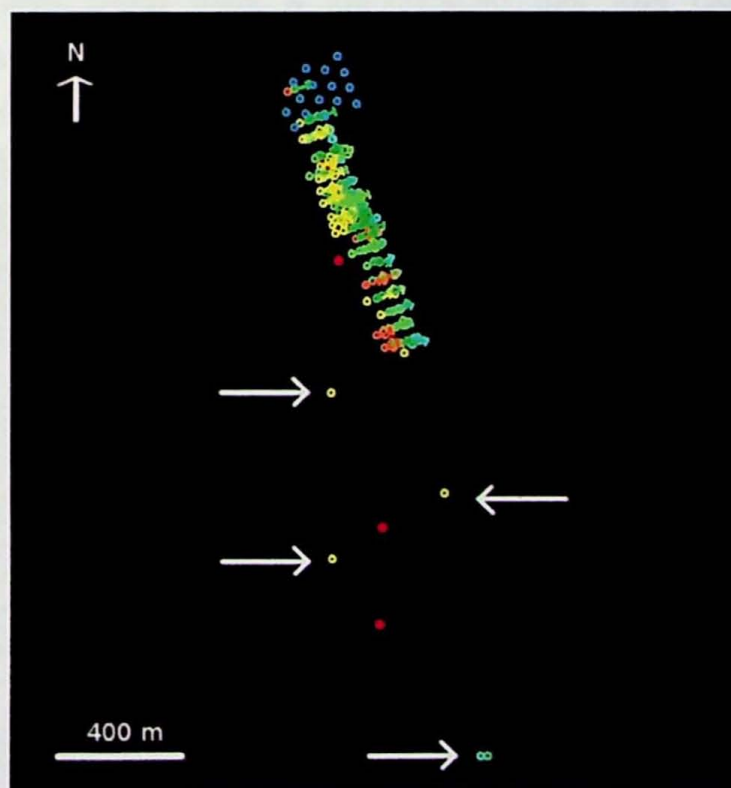
utilizadas foram regularizadas. Algumas sondagens não possuíam nenhuma análise química dos metais e, nesses casos, foram retiradas da tabela utilizada para as análises estatística/geostatística e posterior estimativa (**Tabela 1**).

**Tabela 1** – Sondagens retiradas da tabela de análises químicas por não possuírem dados de teores.

Sondagens retiradas				
PAF003	PAF028	PAF084	PAF094	PAF129
PAF021	PAF029	PAF085	PAF096	PAF131
PAF023	PAF030	PAF088	PAF109	PAF133
PAF024	PAF059	PAF090	PAF110	PAF134
PAF025	PAF079	PAF091	PAF123	PAF135
PAF026	PAF082	PAF092	PAF124	-

Mesmos com as lacunas de litologia, todas as sondagens possuem descrição litológica no restante do furo, dessa forma, as lacunas foram corrigidas da mesma forma que a tabela de análises químicas e nenhuma sondagem foi excluída da tabela de litologia.

Não foram encontrados casos de sobreposição em nenhuma das tabelas do banco de dados. Assim como não foram reconhecidos erros de coordenadas e cotas, porém alguns furos muito distantes do corpo principal de sondagens foram descartados, pois estes furos prejudicariam as análises subsequentes (Figura 14). Deste modo evita-se a suavização na estimativa de grandes volumes entre essas sondagens distantes e a porção da amostragem, cujos furos estão próximos.



**Figura 14** – Exemplos de sondagens distantes retiradas (indicadas pelas setas), sendo considerada apenas a malha a norte da área onde os furos estão mais próximos entre si.

Os valores de máximo e mínimo dos teores são coerentes com o tipo de depósito e minerais de minério (esfalerita e galena). Outro fator importante a ser considerado é o suporte da amostragem. Com isso, 16 sondagens a trado, de até 15 metros de profundidade foram eliminadas do banco de dados. Justifica-se esta retirada, pois, estes furos de trado além de não estarem no mesmo suporte das sondagens rotativas, não foram utilizados nem na modelagem, nem nas estimativas (Figura 15).

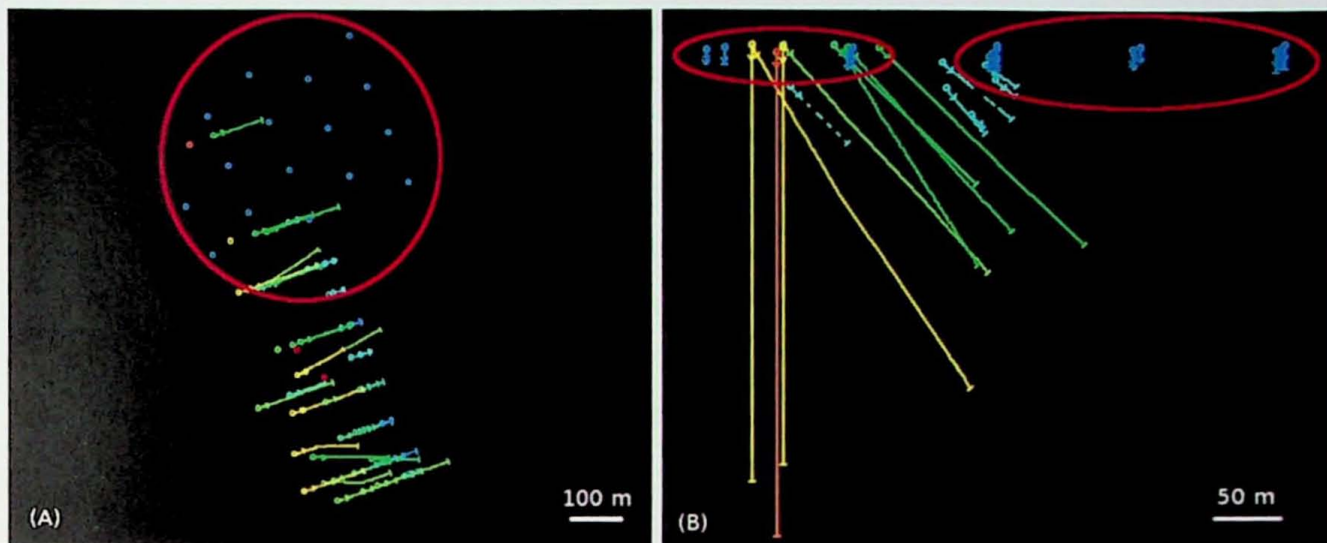


Figura 15 – Sondagens a trado retiradas do banco de dados devido ao suporte diferenciado das sondagens rotativas. (A) Planta e (B) Perfil.

## 6.2 Modelagem Geológica 3D

A modelagem geológica consistiu na interpretação de aproximadamente 25 seções verticais. Essa etapa teve como base a identificação das três categorias litológicas separadas na análise estatística: a brecha, o minério oxidado e o sulfetado. Como exemplo, seções típicas do depósito são apresentadas na Figura 16.

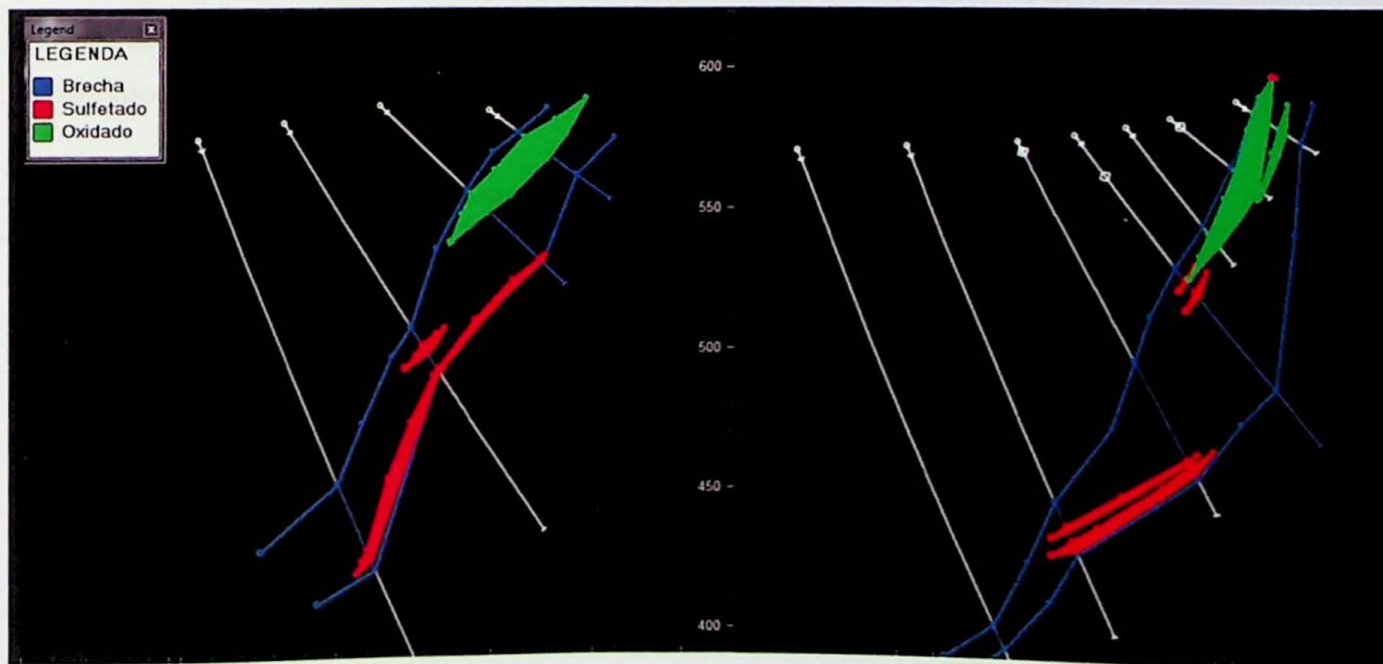


Figura 16 – Seções típicas do depósito com os corpos identificados.

Para a modelagem 3D foi utilizada como legenda o campo LITO, separando os trechos das sondagens de acordo com a litologia, além disso, colunas com os teores dos trechos foram utilizadas para auxiliar na interpretação dos corpos e a sua continuidade.

Os corpos de minério sulfetado e oxidado encontram-se na forma de filões geralmente alongados, estirados, falhados e imbricados pela ação tectônica. Os corpos oxidados estão sempre acima dos corpos sulfetados, e tem profundidade limitada, isso se dá devido aos processos de oxidação que atuam mais próximos à superfície. Todas essas observações confirmam as informações levantadas na revisão bibliográfica. Os corpos sulfetados possuem continuidade lateral baixa e volumes menores, já os oxidados apresentam-se mais contínuos lateralmente, em corpos mais largos e com volumes maiores.

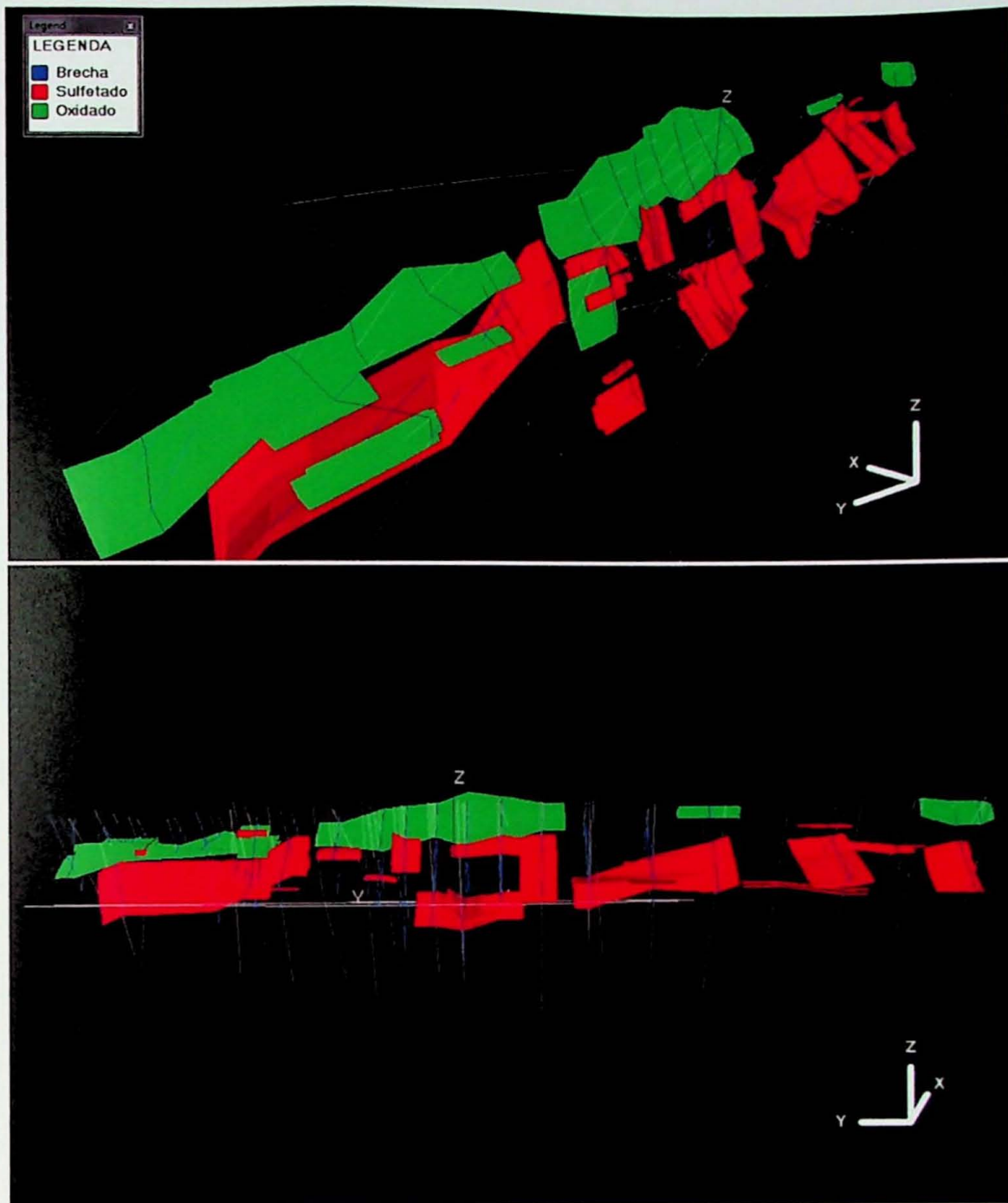
A brecha modelada serviu como uma envoltória dos corpos mineralizados principais, auxiliando na análise da tectônica local e disposição desses corpos. Para o minério oxidado e sulfetado com continuidade entre seções foram gerados sólidos (*wireframes*) conectando os corpos 2D (*strings*), e para aqueles sem continuidade lateral os corpos 2D foram prolongados até a meia distância entre seções. Essa fase da geração dos sólidos é importante, pois esses *wireframes* (Figura 17) foram utilizados para selecionar as amostras que serão regularizadas e usadas na análise geoestatística (cálculo dos variogramas experimentais e ajuste dos modelos teóricos) e serão preenchidos pelo modelo de blocos para a estimativa dos recursos.

### 6.3 Análise Estatística

Após a validação dos dados, e correção dos erros encontrados, foi possível iniciar a análise estatística, que foi baseada na separação dos dados em três categorias diferentes: sulfetado e oxidado (que são considerados os minérios), e brecha (pouco mineralizada). A estatística básica foi efetuada com os dados brutos, sem a regularização (Tabela 2).

Tabela 2 – Estatística básica das categorias citadas.

	Amostras	Mínimo	Máximo	Média	Variância
Zn (Sulfetado)	231	0.25	28.6	4.99	13.88
Pb (Sulfetado)	231	0	23.8	0.63	4.11
Zn (Oxidado)	287	0.32	44.91	12.54	135.26
Pb (Oxidado)	287	0	25.98	1.77	11.36
Zn (Brecha)	949	0	10.21	0.63	0.49
Pb (Brecha)	943	0	10.35	0.26	0.33



**Figura 17** – Wireframes dos corpos de minério gerados na modelagem geológica em duas visadas utilizando diferentes ângulos.

A regularização dos furos foi feita para as variáveis Zn e Pb, por comprimento, em trechos de até 1 m, que é a moda do tamanho das amostras analisadas, e no mínimo 0.5 m. A composição dos dados foi processada no Datamine® e importados para o Isatis®, onde foi calculada a estatística básica (Tabela 3), os histogramas e os variogramas experimentais.

**Tabela 3** – Estatística básica das categorias citadas, com as amostras regularizadas para Zn e Pb.

	Amostras	Mínimo	Máximo	Média	Variância
Zn (Sulfetado)	217	0.25	20.17	4.89	9.85
Pb (Sulfetado)	217	0	11.3	0.51	1.14
Zn (Oxidado)	318	0.56	44	11.59	110.05
Pb (Oxidado)	318	0.03	24.81	1.52	7.28
Zn (Brecha)	1125	0	6.28	0.58	0.3
Pb (Brecha)	1123	0	10.35	0.24	0.25

Os valores de máximo e mínimo são coerentes com os minerais de minério do depósito. O histograma é uma forma simples e efetiva de visualizar atributos dos dados de teores, sendo que a forma da distribuição é um modo qualitativo de avaliação dos dados (Sinclair & Blackwell, 2002). Os histogramas calculados para as categorias mostram assimetria positiva, típica de depósitos de metais base, como o Zn e Pb.

Com a regularização das amostras foi possível observar uma melhora na visualização dos dados. Os histogramas estão visivelmente melhor estruturados. Conforme o esperado a média dos teores antes e depois da regularização manteve-se relativamente constante, e a variância é menor após o processo de regularização das amostras.

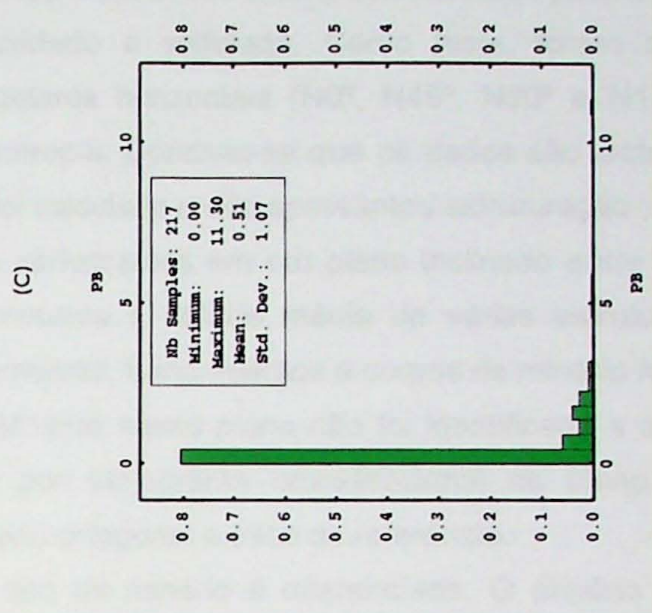
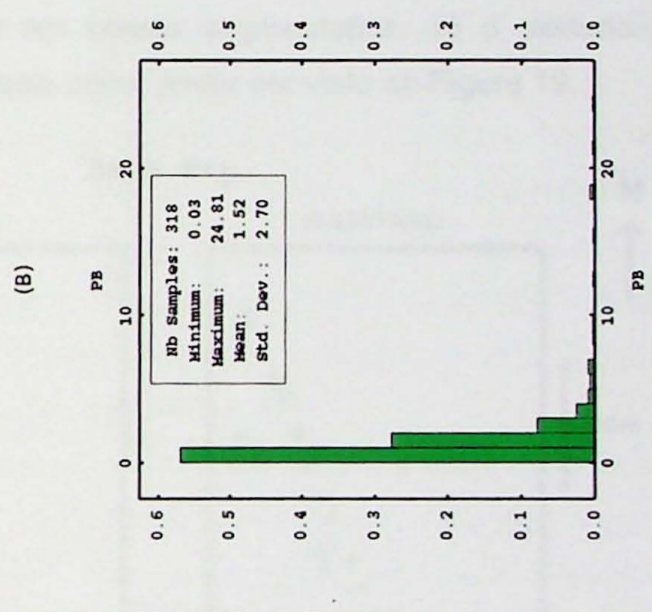
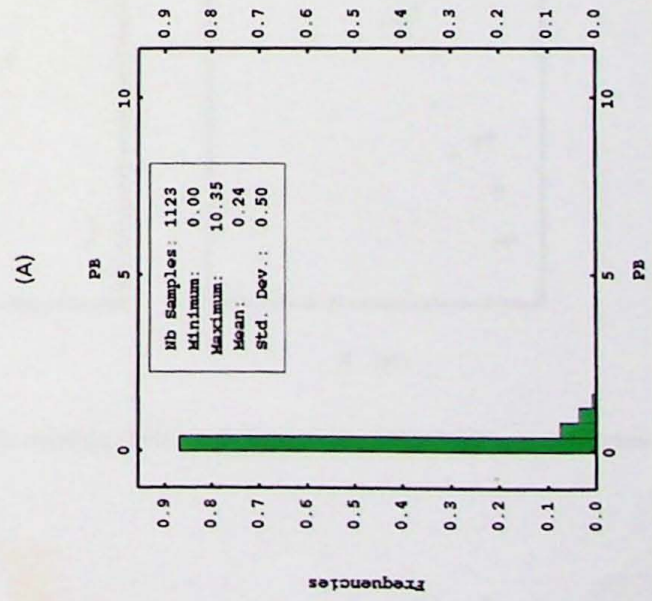
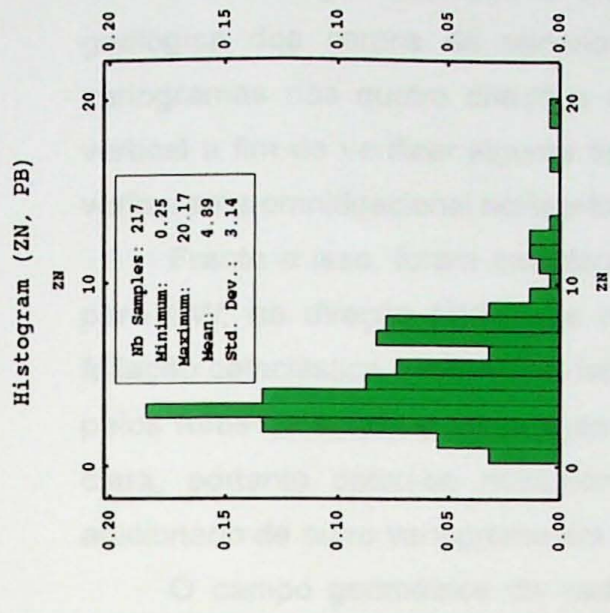
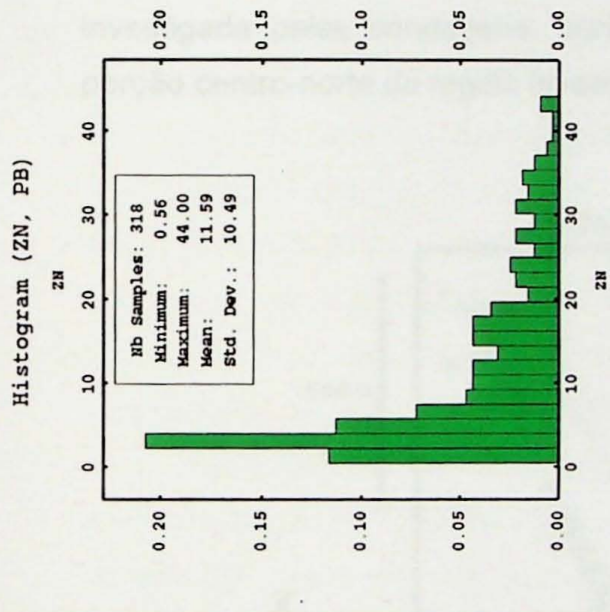
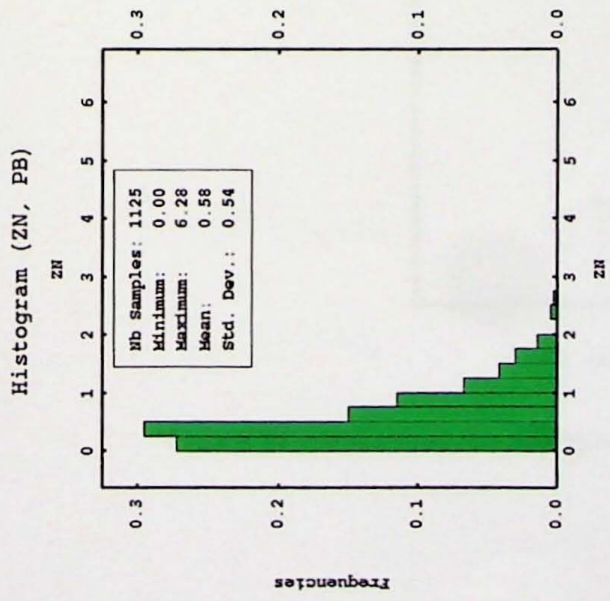


Figura 18: Histogramas de frequência de Zn e Pb (com amostras regularizadas) das três categorias, separadas em (A) Brecha, (B) Oxidado e (C) Sulfetado.

#### 6.4 Análise Geoestatística

A análise geoestatística foi efetuada a partir dos dados selecionados pela modelagem geológica dos corpos de minério oxidado e sulfetado. Como teste, foram calculados variogramas nas quatro direções regulares horizontais ( $N0^\circ$ ,  $N45^\circ$ ,  $N90^\circ$  e  $N135^\circ$ ) e na vertical a fim de verificar alguma anisotropia. Concluiu-se que os dados são isotrópicos. O variograma omnidirecional horizontal foi calculado e não apresentou estruturação.

Frente a isso, foram calculados variogramas em um plano inclinado entre  $40^\circ$  e  $50^\circ$  para SW, na direção  $N160$  que representa a atitude média de várias estruturas como foliação cataclástica e milonítica, falhamentos, bandamentos e corpos de minério registrados pelos furos de sonda e modelagem. Mesmo nesse plano não foi identificada a anisotropia clara, portanto optou-se novamente por variograma omnidirecional no plano inclinado adicionado de outro variograma em plano ortogonal a esse de referência.

O campo geométrico de cada tipo de minério é diferenciado. O minério sulfetado, apesar de menos contínuo lateralmente, é encontrado em praticamente toda a área investigada pelas sondagens, porém em corpos segmentados. Já o oxidado ocorre na porção centro-norte da região investigada, como poder ser visto na Figura 19.

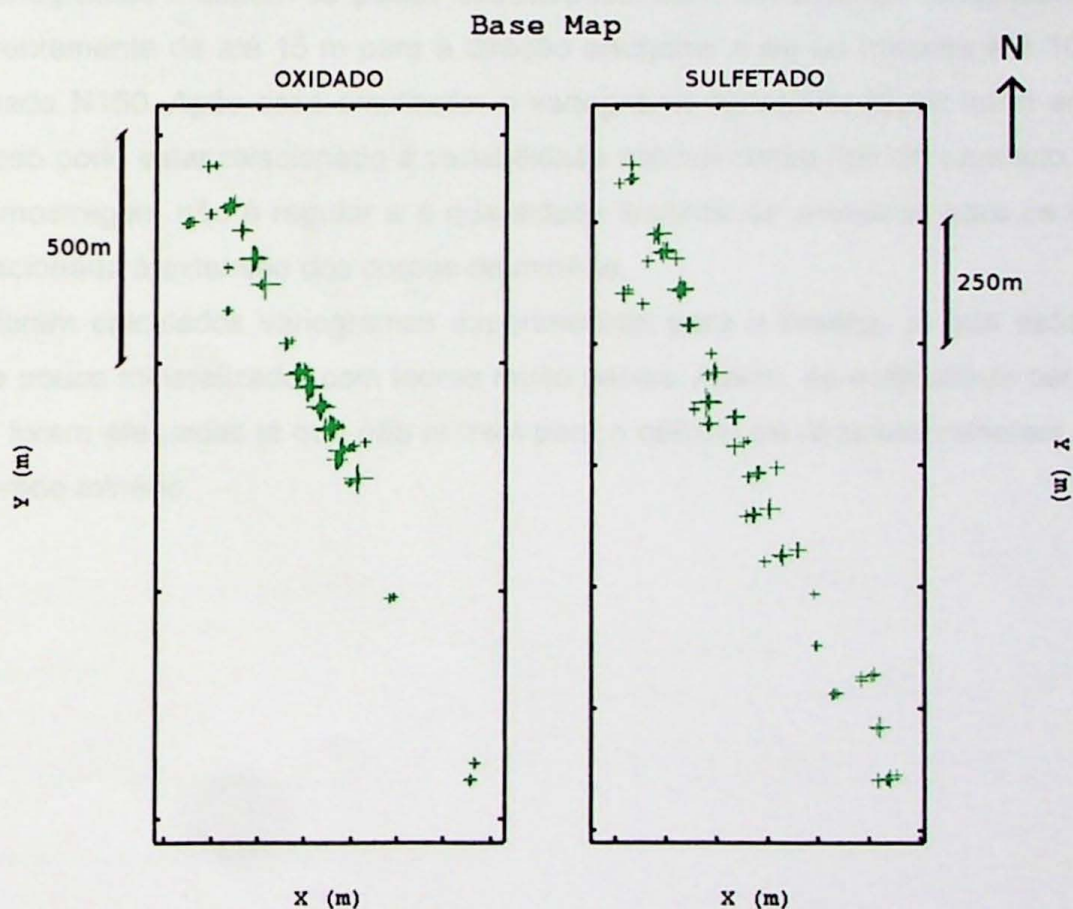


Figura 19 – Mapa base dos dois tipos de minério com localização das amostras selecionadas.

O campo geométrico considerado para o minério oxidado é de aproximadamente 380 metros, e para o sulfetado de 650 metros, para as direções no plano de referência N160. Na direção ortogonal ao plano o campo geométrico varia muito, pois depende muito da profundidade máxima de cada sondagem.

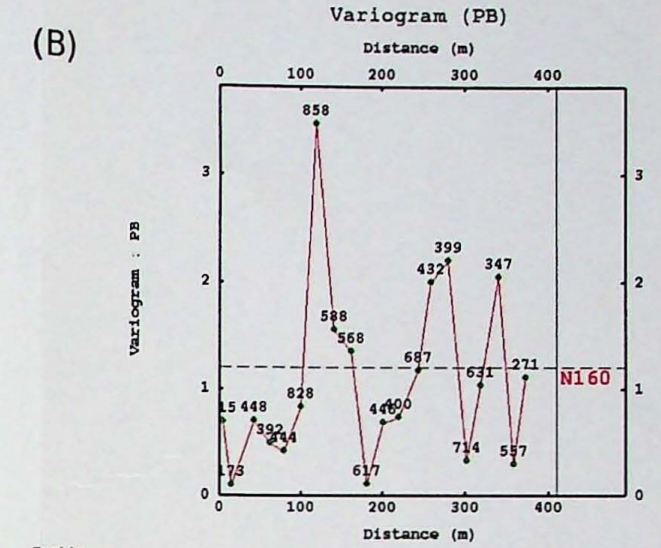
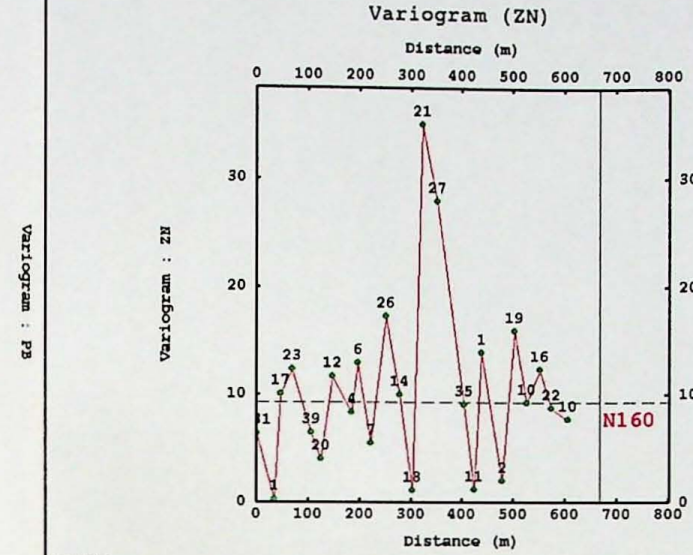
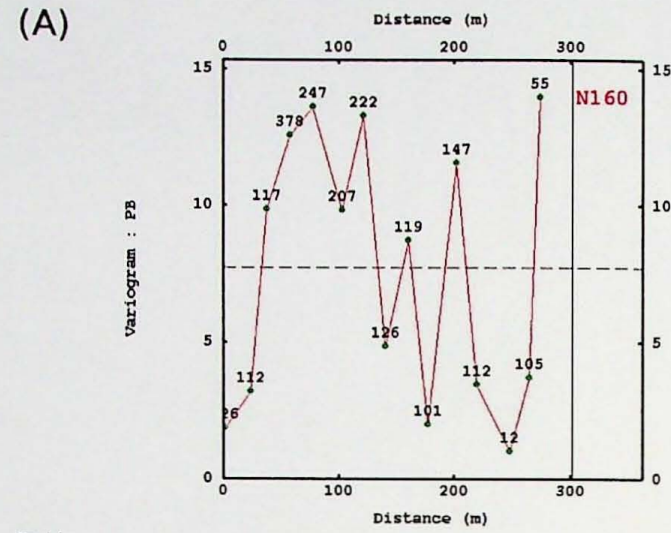
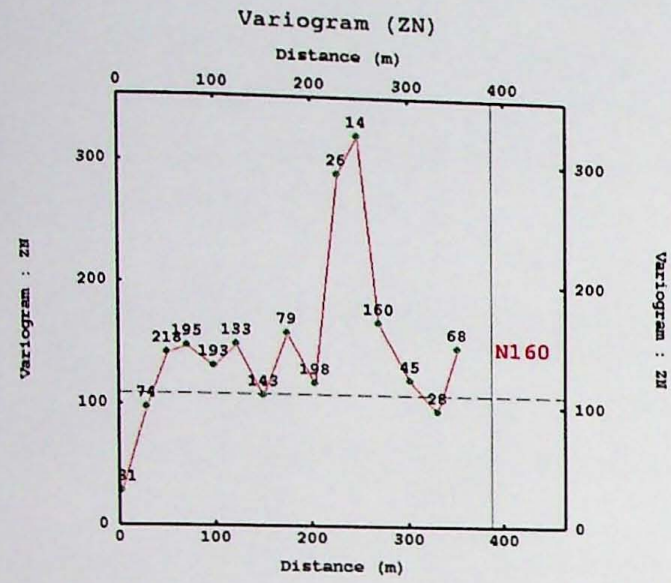
O número de passos para cada tipo de minério no plano N160 também varia já que a malha não é regular e a distância média das amostras vai de 25 até 80 metros. Porém a distância média usada como passo (*Lag*) foi de 25 metros, pois dessa forma o número de amostras desconsideradas nas estimativas será menor. Da mesma forma, na ortogonal o passo usado variou entre 2 e 4 metros dependendo do metal e o tipo de minério analisado.

Em resumo, os variogramas foram calculados um a um, de acordo com o tipo de minério (oxidado e sulfetado), metal (Zn e Pb) e direção (N160 e Ortogonal), buscando os melhores variogramas possíveis. Com isso foram gerados 8 variogramas experimentais, mostrados na Figura 20, com os parâmetros especificados, na figura.

Os parâmetros são muito diferentes entre si, mesmo em minérios iguais, mas isso se deve ao comportamento individual das variáveis Zn e Pb em relação ao minério e à direção analisada.

Os variogramas mostram-se pouco estruturados, com um alcance (amplitude) baixo, sendo aparentemente de até 15 m para a direção ortogonal e de no máximo até 100 m no plano inclinado N160. Após essa amplitude, o variograma apresenta muito ruído em todos os casos, isso pode estar relacionado à variabilidade natural desse tipo de depósito, ao fato de que a amostragem não é regular e a quantidade limitada de amostras para os cálculos quando relacionada à extensão dos corpos de minério.

Não foram calculados variogramas experimentais para a brecha, já que este litotipo encontra-se pouco mineralizado, com teores muito baixos. Assim, as estimativas para esses corpos não foram efetuadas já que não entram para o cálculo de recursos minerais por não ser considerado minério.

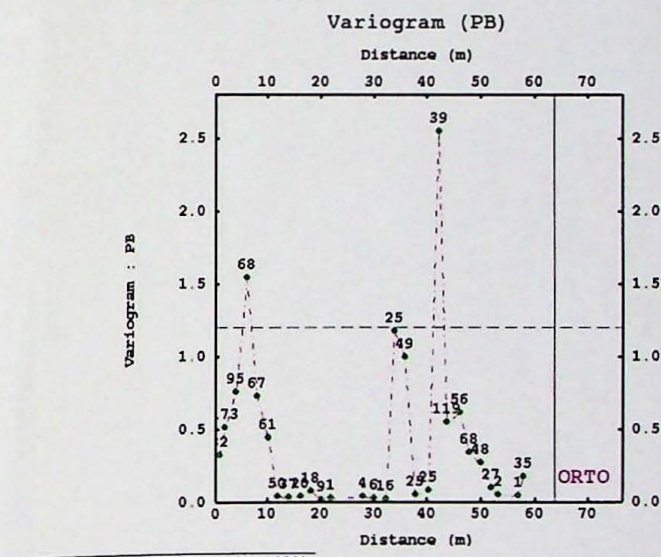
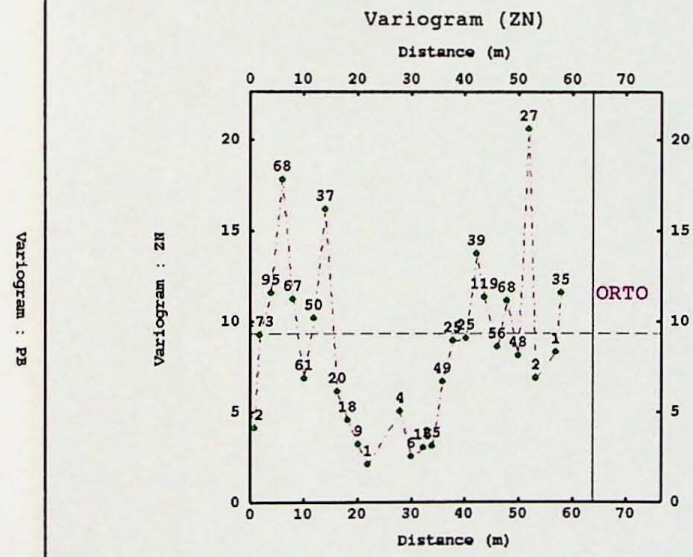
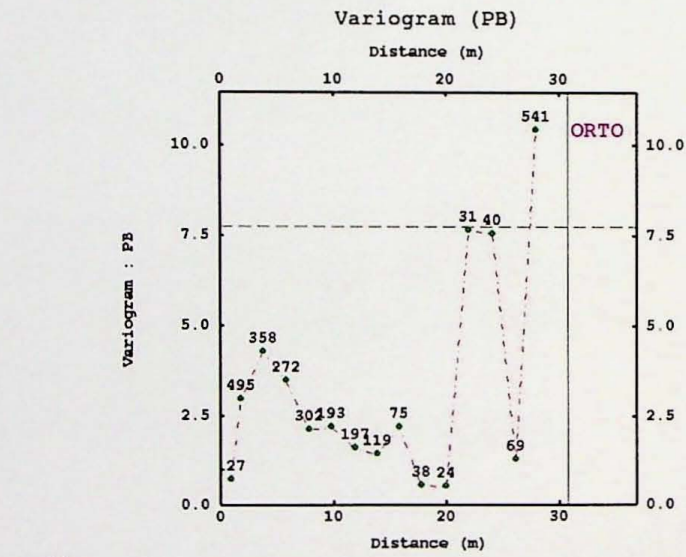
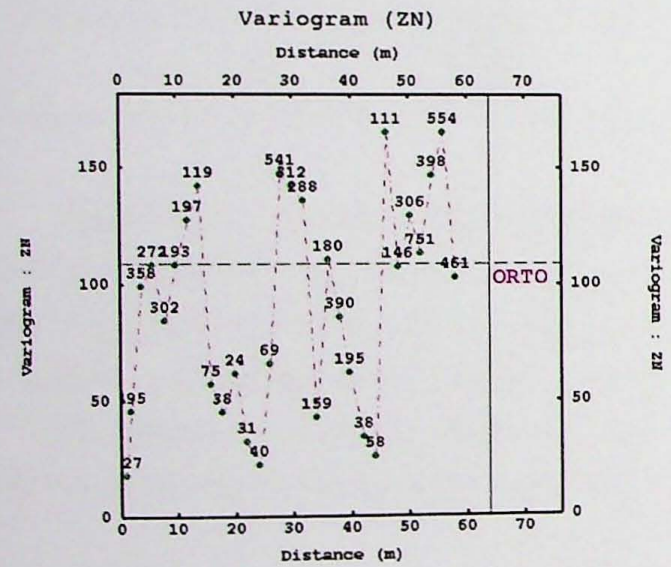


Isatis  
 furos/lines(sel\_lito\_colour{10})  
 - Variable #1 : ZN  
 Experimental Variogram : in 1 direction(s)  
 D1 : N160  
 Angular tolerance = 90.00  
 Lag = 25.00m, Count = 15 lags, Tolerance = 50.00%  
 Vertical Slicing = 1.00m

Isatis  
 furos/lines(sel\_lito\_colour{10})  
 - Variable #1 : PB  
 Experimental Variogram : in 1 direction(s)  
 D1 : N160  
 Angular tolerance = 90.00  
 Lag = 20.00m, Count = 15 lags, Tolerance = 50.00%  
 Vertical Slicing = 1.20m

Isatis  
 furos/lines(sel\_lito\_colour{9})  
 - Variable #1 : ZN  
 Experimental Variogram : in 1 direction(s)  
 D1 : N160  
 Angular tolerance = 90.00  
 Lag = 25.00m, Count = 25 lags, Tolerance = 50.00%  
 Vertical Slicing = 1.17m

Isatis  
 furos/lines(sel\_lito\_colour{9})  
 - Variable #1 : PB  
 Experimental Variogram : in 1 direction(s)  
 D1 : N160  
 Angular tolerance = 90.00  
 Lag = 20.00m, Count = 20 lags, Tolerance = 50.00%  
 Vertical Slicing = 1.17m



Isatis  
 furos/lines(sel\_lito\_colour{10})  
 - Variable #1 : ZN  
 Experimental Variogram : in 1 direction(s)  
 D2 : ORTO  
 Angular tolerance = 90.00  
 Lag = 2.00m, Count = 30 lags, Tolerance = 50.00%

Isatis  
 furos/lines(sel\_lito\_colour{10})  
 - Variable #1 : PB  
 Experimental Variogram : in 1 direction(s)  
 D2 : ORTO  
 Angular tolerance = 90.00  
 Lag = 2.00m, Count = 15 lags, Tolerance = 50.00%

Isatis  
 furos/lines(sel\_lito\_colour{9})  
 - Variable #1 : ZN  
 Experimental Variogram : in 1 direction(s)  
 D2 : ORTO  
 Angular tolerance = 90.00  
 Lag = 2.00m, Count = 30 lags, Tolerance = 50.00%

furos/lines(sel\_lito\_colour{9})  
 - Variable #1 : PB  
 Experimental Variogram : in 1 direction(s)  
 D2 : ORTO  
 Angular tolerance = 90.00  
 Lag = 2.00m, Count = 30 lags, Tolerance = 50.00%  
 Lag = 2.00m, Count = 30 lags, Tolerance = 50.00%

Figura 20: Variogramas calculados nas direções N160 e ortogonal para Zn e Pb nos minérios (A) oxidado e (B) sulfetado.

Foram ajustados modelos teóricos de variogramas para Zn e Pb oxidados, e Zn e Pb sulfetados, na direção N160 com mergulho de 40° para SW. Em todos os casos foram encontradas anisotropias entre a direção do plano inclinado e na direção perpendicular a ele. Apenas no variograma do Zn oxidado a anisotropia observada é a geométrica, o restante é caracterizado por anisotropias mistas.

Nos modelos teóricos de variograma foi possível caracterizar as amplitudes, patamares e efeito pepita dos variogramas do minério oxidado e sulfetado, sendo que todos são modelos esféricos (Tabela 4).

**Tabela 4** – Parâmetros dos modelos teóricos de variograma.

Tipo de Minério	Metal	Direção	Amplitude (m)	Patamar	Efeito Pepita
Oxidado	Zn	N160	60	135	-
		ORTO	13	135	
	Pb	N160	80	12.2	0.2
		ORTO	5	3.2	
Sulfetado	Zn	N160	80	9.75	3
		ORTO	6	13.75	
	Pb	N160	100	1.15	0.05
		ORTO	10	0.55	

Apesar da pouca estruturação dos variogramas foi possível um ajuste razoável dos modelos, levando em consideração o comportamento dos variogramas experimentais como base. Os patamares foram alinhados de acordo com a quantidade de pares nos passos indicados e a amplitude de acordo com a estruturação do experimental.

Os modelos teóricos de variograma dos minérios oxidado e sulfetado, e os demais parâmetros são apresentados nas Figuras 21 e 22.

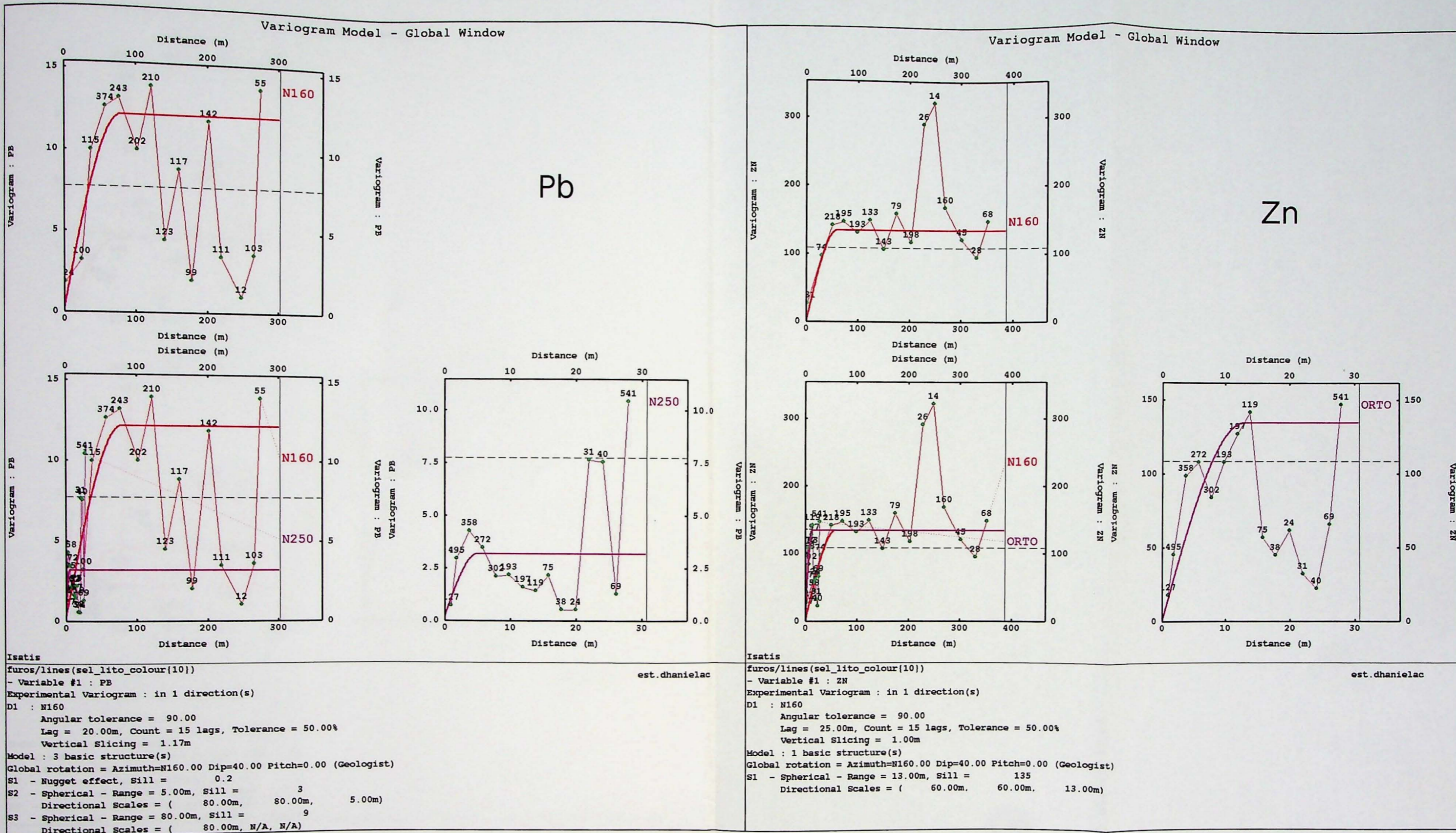


Figura 21: Modelos teóricos de variograma do minério oxidado.

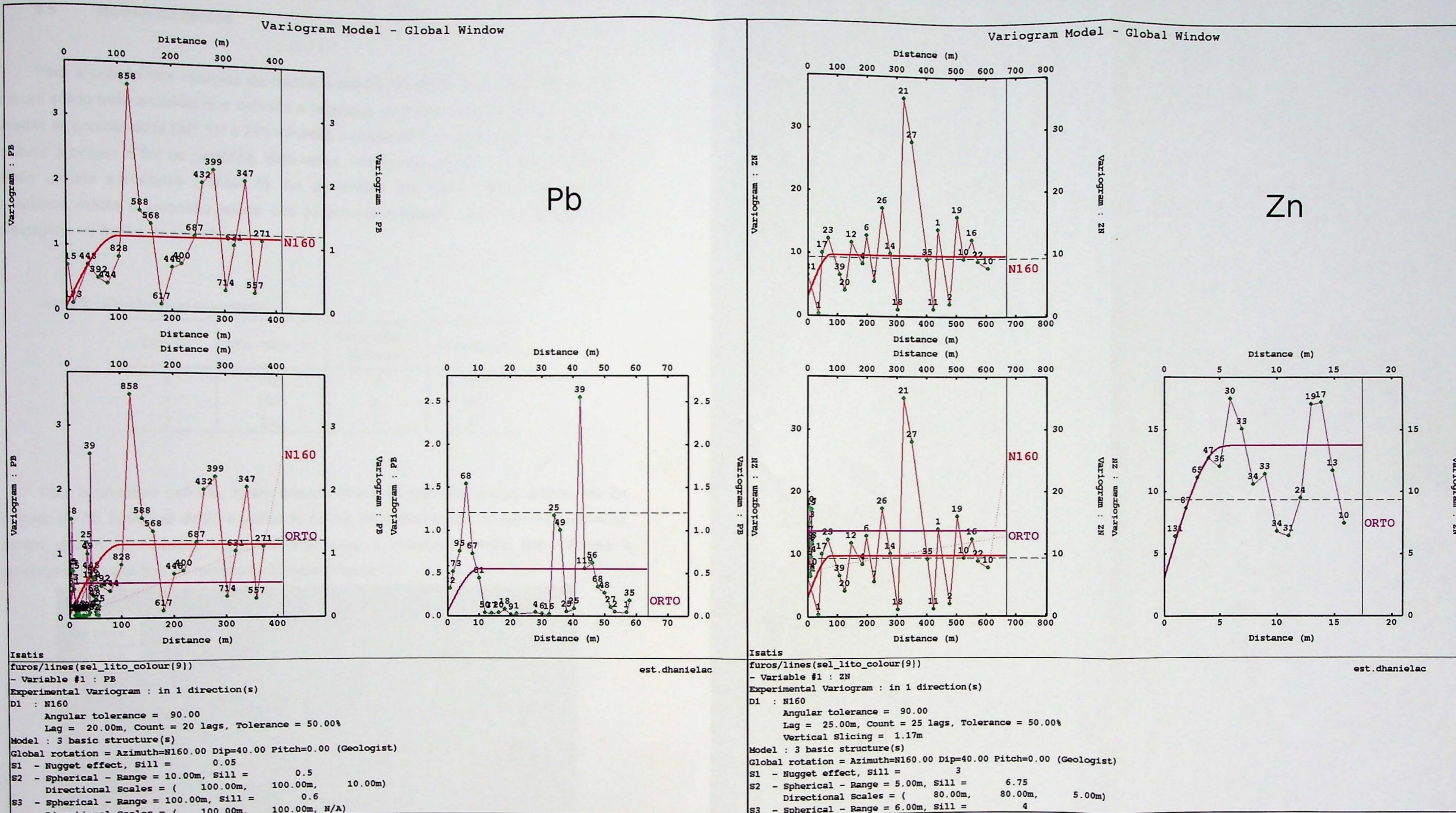


Figura 22: Modelos teóricos de variograma do minério sulfetado.

## 6.5 Modelo de Blocos

Para a criação dos modelos de blocos é necessário definir o protótipo, que consiste em um sólido tridimensional que delimita o local que será preenchido pelos blocos. Foram usadas as coordenadas (XP, YP e ZP) mínimas e máximas dos pontos dos *wireframes* para calcular a origem e fim do protótipo, dimensões, número de células em cada direção e se serão usadas subcélulas (Tabela 5). As dimensões dos blocos estão relacionadas à espessura média e extensão lateral dos corpos mineralizados, além das distâncias das sondagens na malha de amostragem.

Tabela 5 – Características do protótipo.

Direção	Mín - Máx (m)	Dimensão do Bloco (m)	Nº de Blocos
X	645	3	215
Y	1405	15	94
Z	230	3	77

Com o protótipo definido, foram criados quatro modelos de blocos: oxidado de Zn, oxidado de Pb, sulfetado de Zn e sulfetado de Pb. Os modelos têm as mesmas dimensões, porém devem ser criados separadamente para a cubagem correta dos volumes e tonelagens de cada tipo de minério e de metal (Figura 23).

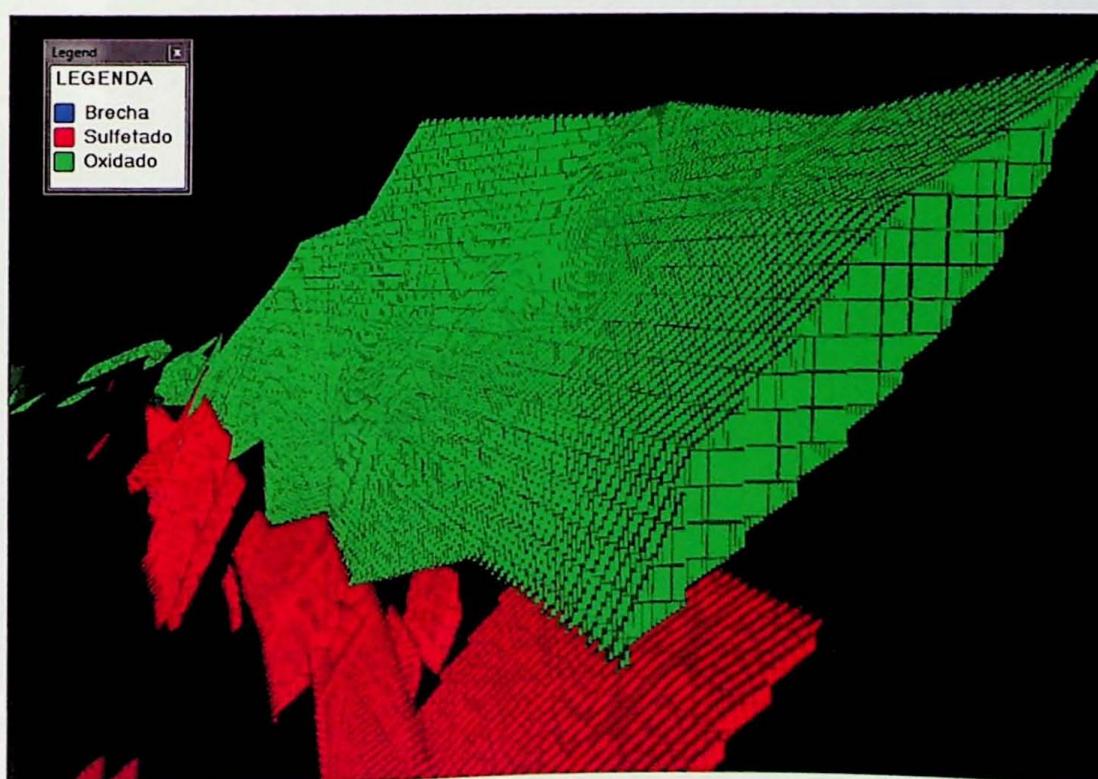


Figura 23: Modelo de blocos de Zn e Pb para cada tipo de minério.

Os *wireframes* dos corpos de minério foram preenchidos por blocos, e para que não ocorra perda de volume, foram usadas as subcélulas, que são blocos menores do que a dimensão definida no protótipo.

Porém, esse procedimento cria vários suportes diferentes, o que é incorreto na estimativa. Com isso os modelos de blocos foram regularizados (Figura 24) anteriormente à exportação dos dados ao Isatis® e após as estimativas por krigagem, os blocos foram importados novamente no Datamine® e os teores estimados foram atribuídos às subcélulas. É possível observar o efeito da regularização nas seções da Figura 25.

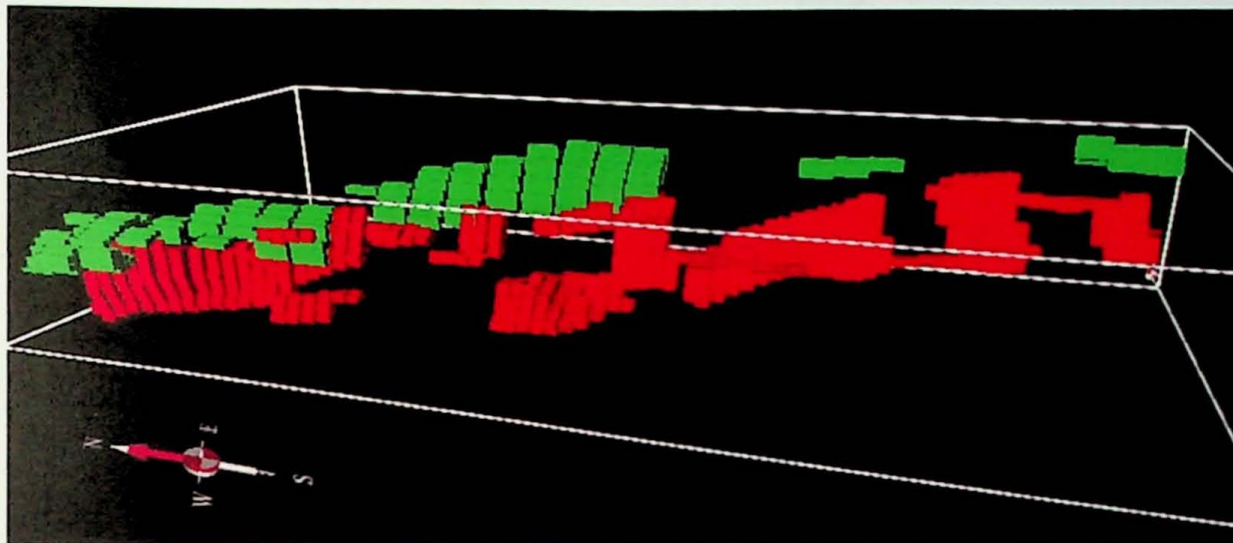


Figura 24: Modelos de blocos regularizados prontos para as estimativas no Isatis®.

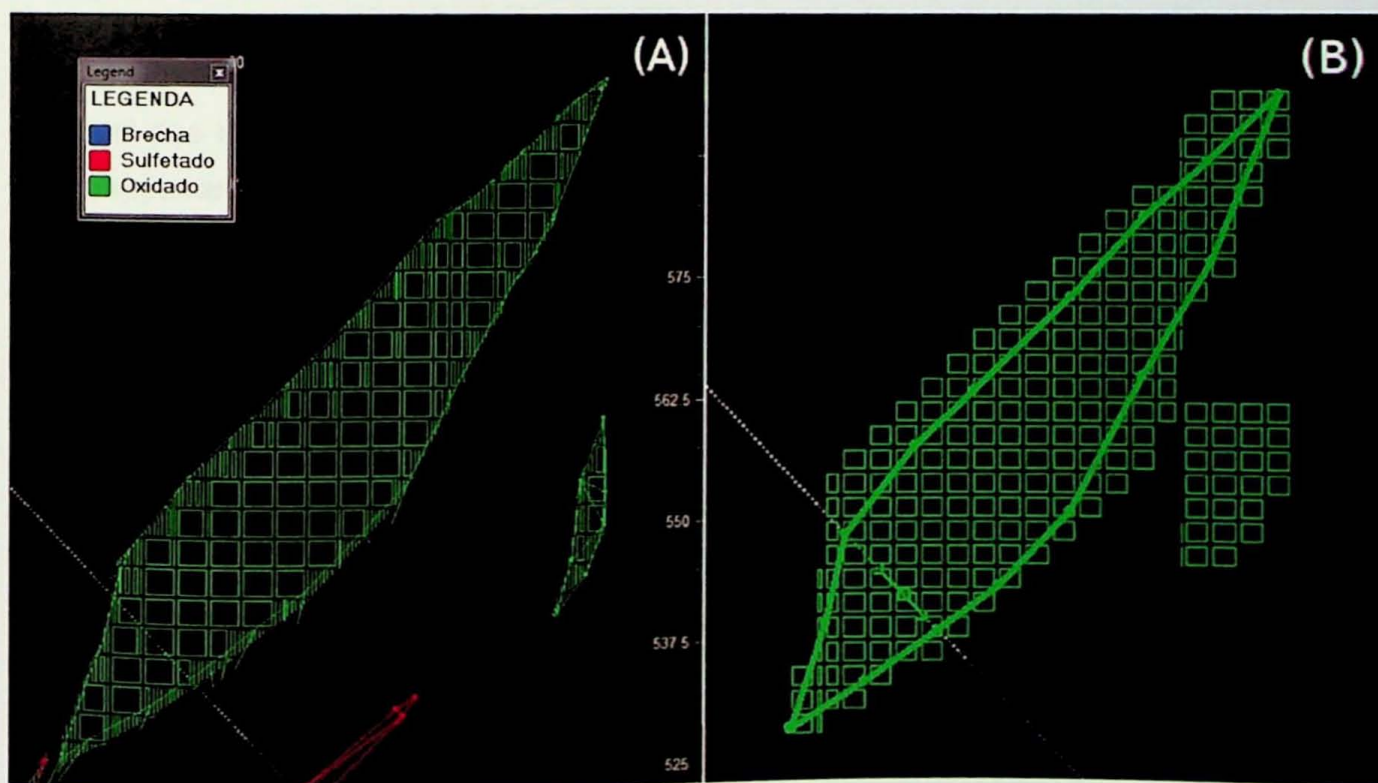


Figura 25: Seção comparando o modelo de blocos com subcélulas (A) e regularizado (B).

## 6.6 Validação Cruzada

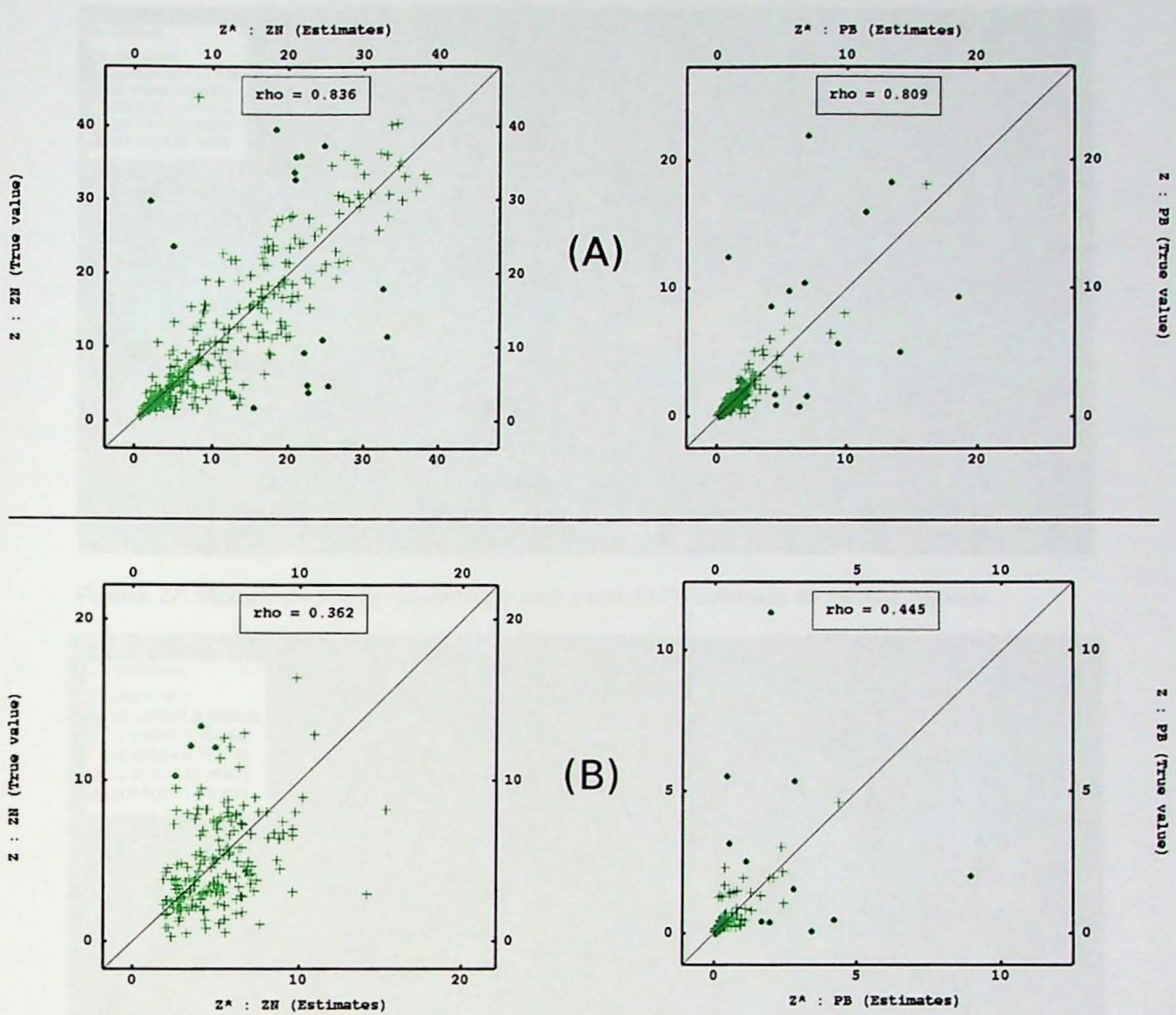
A validação cruzada foi utilizada para aferir os parâmetros de vizinhança escolhidos para o volume de busca na krigagem ordinária. Os parâmetros utilizados são apresentados na Tabela 6:

**Tabela 6:** Parâmetros de vizinhança.

Parâmetro	Valor
U	120 m
V	120 m
W	15 m
Nº Mínimo de Amostras	2
Nº de Setores Angulares	4
Nº Ótimo de Amostras por Setor	2
Azimute	160°
Mergulho	40°

Os valores iniciais escolhidos para U, V e W (eixos do elipsoide que representa a anisotropia) foram definidos de acordo com as amplitudes dos modelos de variogramas ajustados e essa primeira vizinhança foi utilizada para todos os variogramas. Porém, esse volume e parâmetros de busca não foram suficientes para a estimativa de uma quantidade razoável dos blocos regularizados, e por esse motivo justificam-se os valores pouco acima das amplitudes dos modelos teóricos de variograma. O mesmo ocorre para a questão dos setores angulares, número de amostras mínimas e por setor, no qual, quando escolhidos valores muito conservadores, restringem muito a busca e estimativas da krigagem.

Os valores do coeficiente de correlação (Figura 26) obtidos pela validação cruzada variam muito entre os tipos de minério, mas não entre os mesmos quando os parâmetros de vizinhança são modificados. Ainda com parâmetros conservadores a correlação não demonstra mudanças significativas em relação à vizinhança escolhida.



**Figura 26:** Diagramas de dispersão da validação cruzada para os variogramas de Zn e Pb Oxidados (A), e Zn e Pb Sulfetados (B).

## 6.7 Krigagem Ordinária

As estimativas dos teores foram efetuadas a partir da krigagem ordinária de blocos regularizados, provenientes da modelagem geológica.

Foram estimados dois modelos de blocos regularizados, o oxidado (Figura 27) e o sulfetado (Figura 28), e duas variáveis, Zn e Pb, portanto foram efetuadas quatro estimativas no total: Zn sulfetado, Zn oxidado, Pb sulfetado e Pb oxidado.

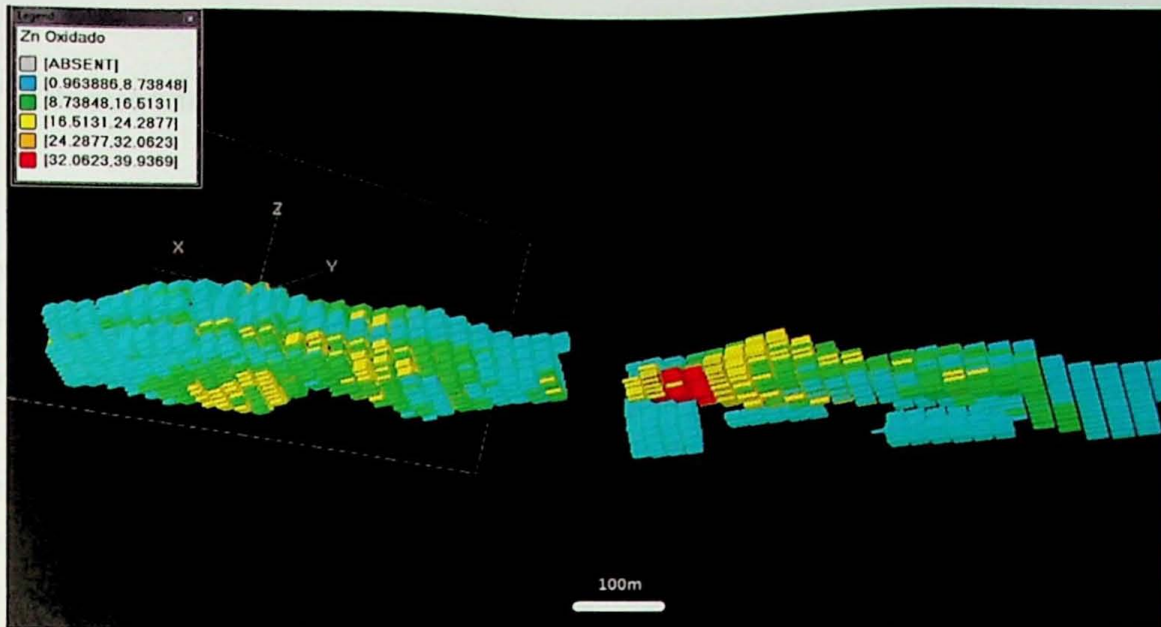


Figura 27: Modelo de blocos regularizado com o teor de Zn estimado do minério oxidado.

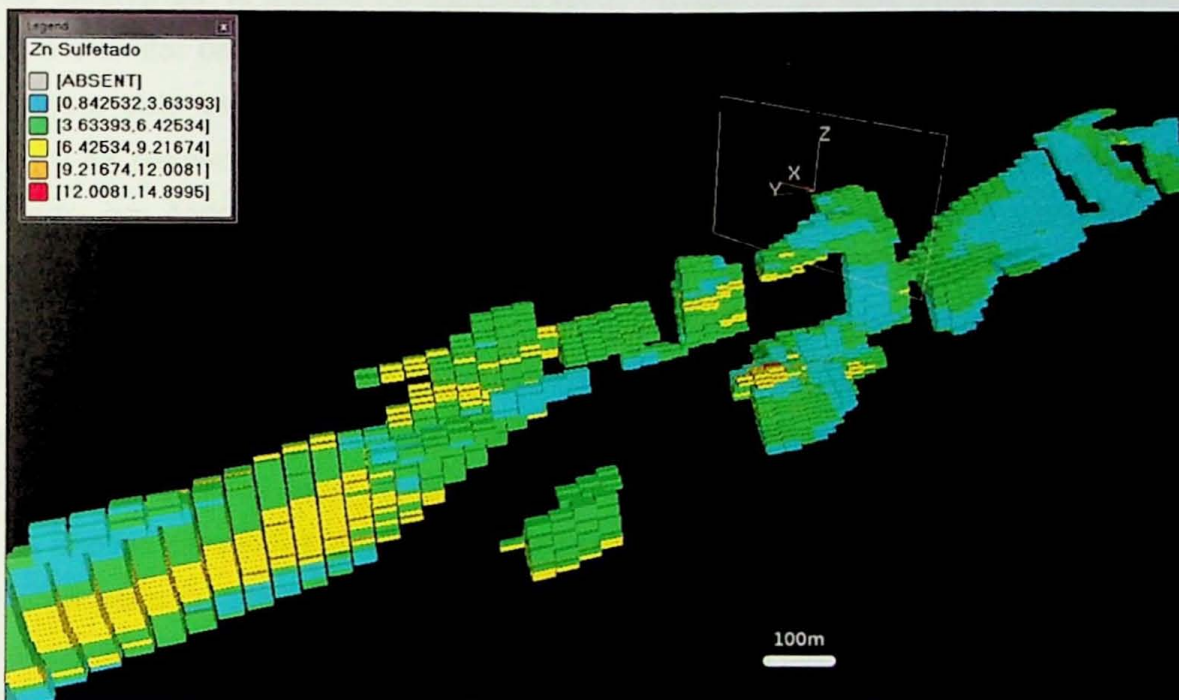


Figura 28: Modelo de blocos regularizado com o teor de Zn estimado do minério sulfetado.

Como parâmetros da krigagem ordinária, foram utilizados os modelos teóricos de variograma ajustados, referentes ao tipo de minério e ao metal em estudo, e a vizinhança citada na validação cruzada. Em relação à vizinhança, no caso do modelo oxidado, esses parâmetros de busca foram suficientes para estimar todos os blocos, porém no caso do sulfetado não foi suficiente. Tendo em vista este problema, os blocos do modelo sulfetado remanescentes foram estimados a partir de uma vizinhança muito mais ampla, com o dobro da distância para U, V e W e com mesmo número mínimo de amostras, setores angulares e número ótimo de amostras por setor que a vizinhança anterior.

## 7. Discussão dos Resultados

A partir do banco de dados consolidado, foi realizada a análise estatística, este tratamento das informações de acordo com os teores das variáveis e características de mineralização teve como consequência a separação em categorias principais: o minério oxidado e sulfetado. Este procedimento é o mais correto a se fazer, pois neste caso não seria possível admitir todos os dados de teores atribuídos a um corpo mineral ou mineralização única. Deste modo acredita-se que o correto é analisar os dados separadamente de acordo com as suas características individuais. A variabilidade dos dados mostra a diferença entre os litotipos separados.

Seguindo esse conceito, a modelagem geológica foi realizada também com base nessas categorias. A brecha foi utilizada como envoltória auxiliar para a interpretação da geologia e limitar os corpos mineralizados, sendo que para esses corpos não foram criados *wireframes*, pois os seus teores não são econômicos. Os corpos sulfetados modelados localizam-se geralmente em grande profundidade, com continuidade lateral mais restrita, ocorrendo em todo o domínio, mas como corpos segmentados. Os corpos oxidados modelados são mais volumosos e, apesar de não se apresentarem em todo o domínio, são mais contínuos quando existentes, além de estarem sempre acima dos corpos sulfetados, relacionados a um limiar raso de oxidação do minério. Para os corpos de minério sulfetado e oxidado foram criados *wireframes* para a seleção das amostras e criação do modelo de blocos para as estimativas.

A análise estatística foi feita antes e depois da seleção das amostras, para se ter um panorama geral do comportamento dos dados com a separação das categorias citadas e da regularização das amostras. Conforme esperado, a média das variáveis manteve-se, porém os valores de variância diminuíram significativamente.

Após a regularização dos dados selecionados, os variogramas experimentais foram calculados. As direções principais analisadas foram nas atitudes médias das foliações, bandamentos (direção de N160 com mergulhos de 40° para SW) e outra ortogonal a esse plano. Foram criados 4 variogramas, de acordo com o tipo (oxidado e sulfetado), o metal (Zn e Pb) e a direção (N160 e ortogonal), sendo que os parâmetros são específicos para cada um, com o intuito de visualizar alguma estruturação. Os variogramas apresentam-se pouco estruturados, e isso pode estar relacionado à complexidade do depósito, à malha pouco regular, à continuidade e frequência dos corpos mineralizados, além do número limitado de amostras selecionadas.

Com base nos variogramas experimentais, foram ajustados os modelos teóricos de variograma do minério oxidado e sulfetado para Zn e Pb. No plano inclinado N160 com

mergulho de 40°SW as amplitudes médias encontradas foram de até 80m, U e V do elipsoide, e na direção ortogonal de até 15m, eixo W. Esses alcances são aceitáveis para esses metais, o que mostra que apesar de poucas amostras os variogramas representaram de modo geral o comportamento espacial das variáveis.

Na validação cruzada ficou claro que diferentes vizinhanças, sejam elas restritivas, obedecendo a amplitude encontrada nos variogramas, ou menos conservadoras, com volumes de buscas maiores, não demonstram mudanças significativas na correlação encontrada pela validação. Portanto, levando em consideração essa correlação, as vizinhanças utilizadas na krigagem ordinária dessa avaliação são consideradas razoáveis.

Para o minério sulfetado a vizinhança escolhida não foi suficiente para a estimativa de todos os blocos do modelo, portanto foi escolhido um volume de busca com o dobro das distâncias para esses blocos. Esses blocos foram carimbados no modelo, indicando que foram estimados com esse volume maior, assim, por questões de confiabilidade da estimativa, eles podem ser identificados se necessário.

Um aspecto importante a ser levado em consideração é a regularização dos modelos de blocos com subcélulas, que são importantes para o preenchimento correto dos *wireframes* dos corpos mineralizados, porém devem ser regularizados para que a krigagem ordinária estime os blocos com o mesmo.

Após as estimativas, os modelos regularizados estimados foram adicionados aos modelos com subcélulas. Dessa forma, os teores estimados dos blocos regularizados foram atribuídos aos modelos de blocos que preenchem corretamente e obedecem aos limites dos corpos mineralizados modelados, assim foi honrado o propósito inicial do trabalho que era a integração do modelo geológico e o modelo químico do depósito mineral. Com isso foram gerados os modelos de blocos finais estimados do minério oxidado de Zn (Figura 29) e de Pb (Figura 30), e o sulfetado de Zn e de Pb (Figura 31).

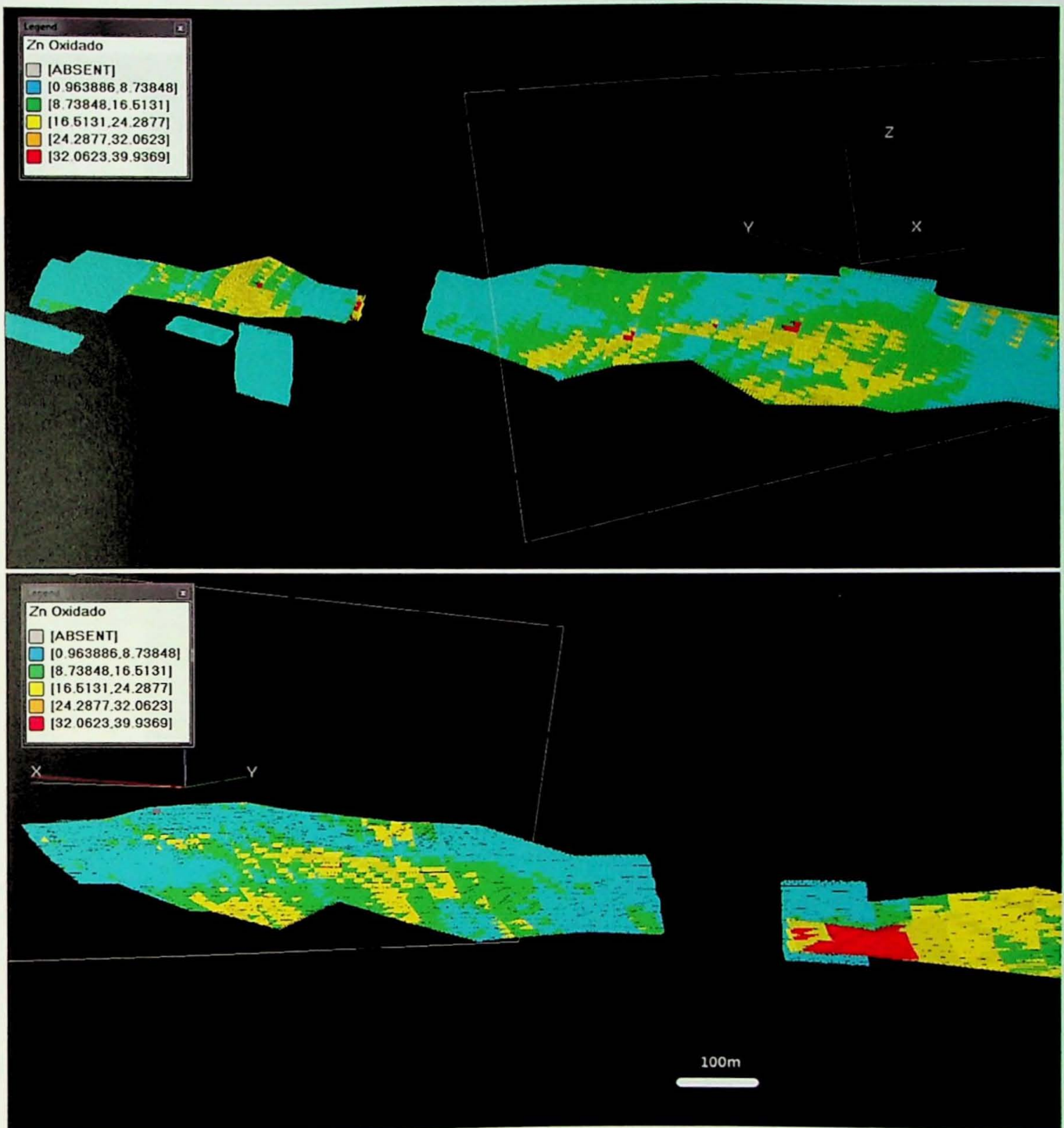


Figura 29: Modelo de blocos final de Zn estimado do minério oxidado em duas visadas diferentes.

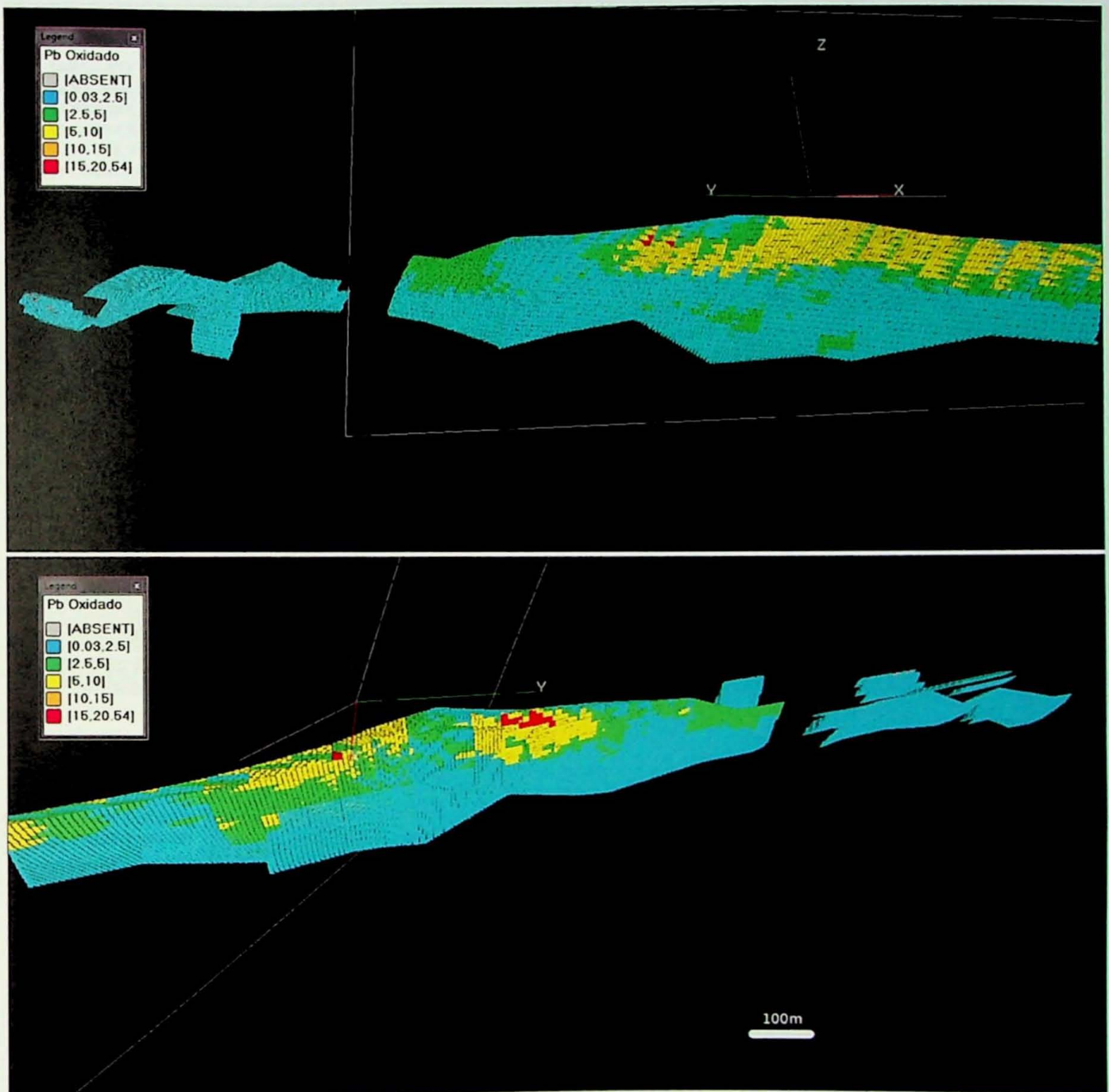


Figura 30: Modelo de blocos final de Pb estimado do minério oxidado em duas visadas diferentes.

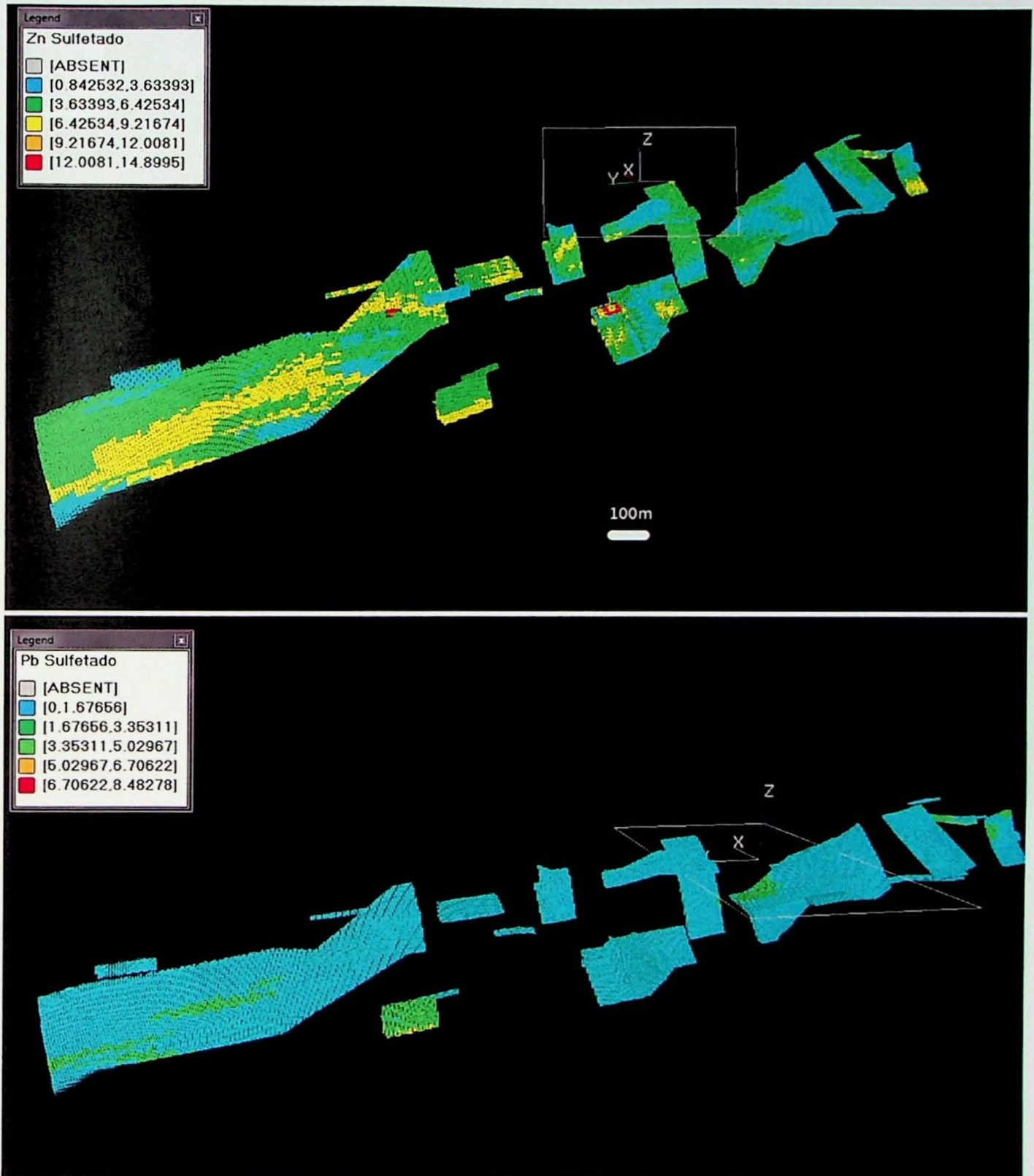


Figura 31: Modelo de blocos final de Zn e Pb estimado do minério sulfetado.

No caso do modelo oxidado, por questão de facilidade na modelagem, os corpos foram interpretados sem a utilização da topografia como limite superior das mineralizações.

Com isso, o modelo de blocos estimados possuía blocos estimados acima da topografia, que foram cortados posteriormente com a topografia como limitante, como visto na Figura 32.

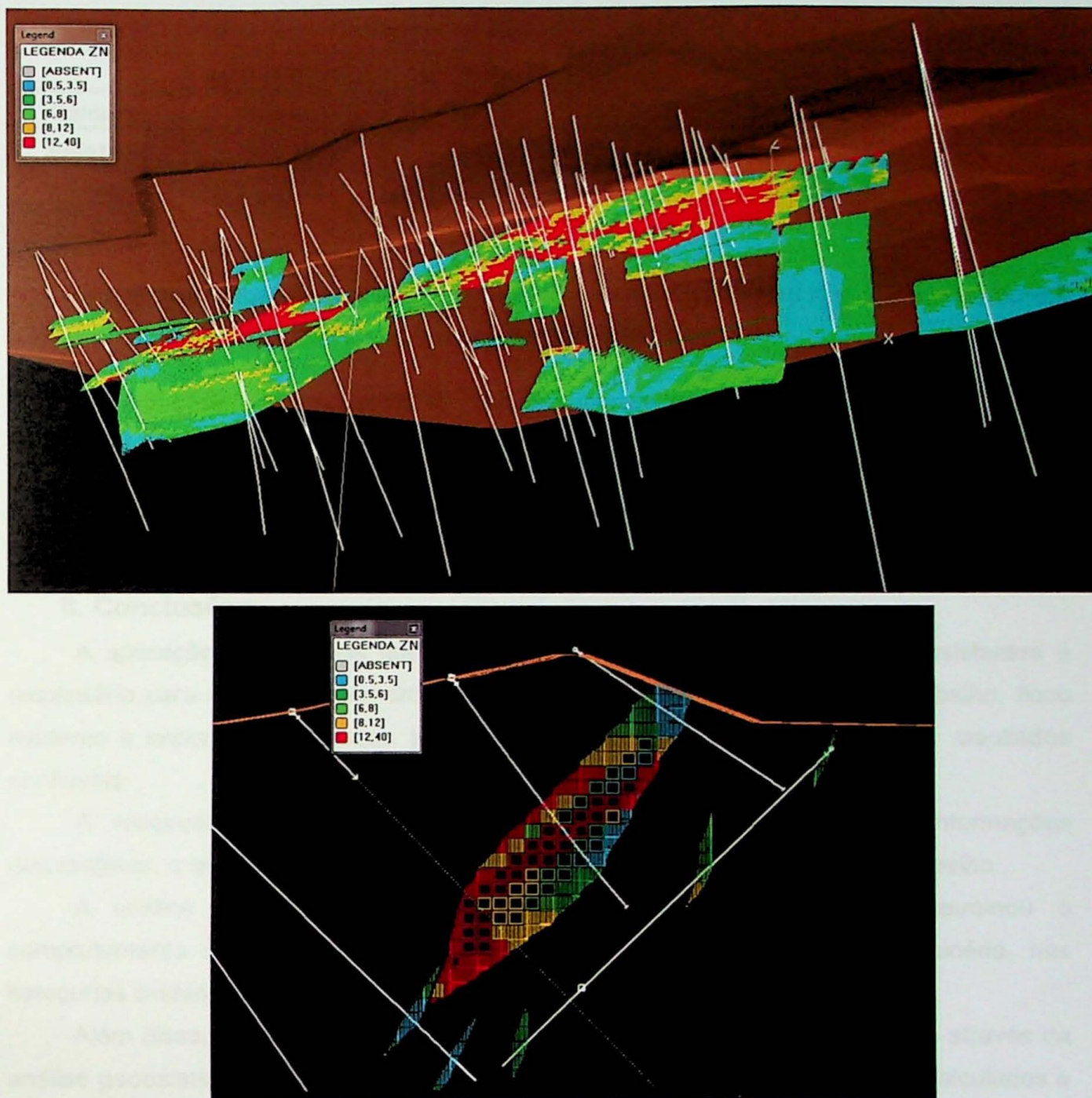


Figura 32: Modelo de blocos final com a topografia em uma vista oblíqua inferior e em seção (minério oxidado e sulfetado, com teores de Zn representados).

Com as estimativas calculadas foi possível obter o volume de cada minério e o seu teor médio, além da tonelagem de metal contido (Tabela 7). As densidades utilizadas para o cálculo foram atribuídas a partir de análises de densidade do minério pela Votorantim Metais

sendo a do oxidado de 2,0 g/cm<sup>3</sup> e do sulfetado de 2,85 g/cm<sup>3</sup>, e estão relacionadas à mineralogia de cada.

Tabela 7: Recursos totais e teores, aproximados.

	Volume Total (t)	Teor de Zn (%)	Teor de Pb (%)	Total de Zn (t)	Total de Pb (t)
<b>Oxidado</b>	820 812	10,87	2,03	89 254	16 633
<b>Sulfetado</b>	962 188	4,75	0,54	45 737	5 280
<b>Total</b>	1 783 000	-	-	134 991	21 913

É possível perceber que o minério sulfetado é mais volumoso que o oxidado, porém possui um teor médio menor em ambos os metais.

Devido à falta de informações de controle de qualidade das análises (QA/QC) e pouca quantidade de amostras, optou-se por não definir e atribuir a classificação dos recursos minerais.

## 8. Conclusões

A aplicação de métodos geoestatísticos e de modelagem geológica consistentes é necessária para uma avaliação criteriosa dos recursos minerais. Durante o trabalho, ficou evidente a importância de todas as etapas realizadas, com o intuito de obter resultados confiáveis.

A validação dos dados retirou todas as inconsistências, erros e informações descartáveis, o que tornou o banco de dados apropriado para a realização do trabalho.

A análise estatística teve papel fundamental no projeto, pois determinou o comportamento dos metais estudados, e separou os dados pelo tipo de minério, nas categorias oxidado e sulfetado.

Além disso, o comportamento espacial das mineralizações foi determinado através da análise geoestatística, com os variogramas experimentais e modelos teóricos, calculados e ajustados, respectivamente, em relação ao plano N160 com inclinação 40SW, que representa a atitude média das foliações, falhas e corpos mineralizados.

Os modelos de blocos, separados por tipo de minério, foram criados obedecendo a malha de sondagem e espessura média dos corpos de minério. A krigagem ordinária atribuiu os valores estimados dos teores a esses blocos. O modelo de blocos do minério oxidado foi posteriormente cortado pela topografia, para que não houvesse blocos flutuando acima do solo, o que implicaria em uma cubagem incorreta do minério.

As correlações encontradas pela validação cruzada variam muito de acordo com o minério, sendo baixa no sulfetado e alta no oxidado. Estes valores baixos podem estar relacionados à variabilidade natural do depósito, mas sobretudo à quantidade restrita de amostras utilizadas.

Os volumes cubados e teores estimados demonstram que o depósito tem um potencial alto, e por isso é sugerido que sejam programados novos furos para adensar a malha de sondagens. Após este adensamento, o número de amostras aumentará e, conseqüentemente, os variogramas experimentais serão possivelmente melhor estruturados, a modelagem geológica estará mais bem definida e a determinação das tonelagens e volumes estimados pela krigagem estariam embasadas em uma quantidade maior de informação, tornando-as mais confiáveis.

Cardenas, M. A., Freitas-Dias, F. H., Souza, J. C. F., De Castro, J. A. & Neto, S. 2002. Caracterização geológica de uma jazida de ouro na unidade de Serra da Uruçupeira, Paraíba. In Congresso Brasileiro de Geologia, 42, São Paulo, Sociedade Brasileira de Geologia, p. 25.

Handoy, G. A., Lewis, R. W., Whelan, J. 1987. The Collection and Interpretation of Ore Reserve Estimation Data. In: Reserves and Resource Management, Australasian Institute of Mining and Metallurgy, p. 27-34.

Houderg, B. W. 1984. 3D Statistical Modeling Computer Technology for Geological Characterization. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, 380p.

Huggenloft, C. J. 1975. Regionalized variables and quantitative analysis of mineral data. In: Davis, J.C. & McCulloch, M.J. (ed) Design and analysis of spatial data. New York, John Wiley, p. 38-52.

Manni, O. J., Fuchs, R. A., Cardenas, M. A. 1991. A avaliação geológica da Faja Brasileira e de sua subseqüente. In: OPI/IBRAG, Recursos Minerais - Ouro no Brasil Francisco e sua Faja Marginal. Anais, p. 70-75.

Marshall, L. N. S. 2002. Metodologia Antropométrica dos Trabalhadores de Ouro no Município, Paraíba e América, aplicadas ao grupo mineiro. Minas Gerais, Tese de Doutorado em Geociências, UFMG, 157p.

Snijder, A., Bochner, G. 2002. Applied Mineral Probability Estimation. Cambridge University Press, 198pp, London, 400p.

Roy, A. G. 1979. Why Geostatistics? Eng. & Min. J., 108(9), p. 42-45.

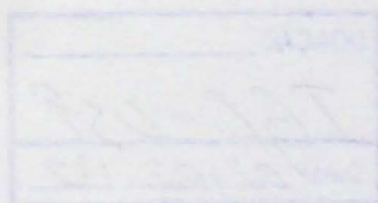
Yamamoto, J. K. 2001. Avaliação e Classificação de Recursos Minerais, São Paulo, Editora da Universidade de São Paulo, 220p.

## 9. Referências Bibliográficas

- Almeida, F. F, M de. 1967. Origem e evolução da plataforma brasileira. *Boletim DNPM*, **243**, 36p.
- Bubeniceck, L. & Haas, A. 1969. *Method of Calculation of the Iron Ore Reserves in the Lorraine Deposit. In: The Decade of Digital Computing in the Mineral Industry. The American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, Inc.* Nova Iorque, p. 179 - 210.
- Dardenne, M. A. 2000. The Brasília Folded Belt. In: Cordani, U.G.; Milani, E.J.; Thomaz Filho, D.A. (eds) 2000. *Tectonic Evolution of South America* Rio de Janeiro. International Geological Congress., 31. p.231-263.
- Dardenne, M. A., Freitas-Silva, F. H., Souza, J. C. F. De, Campos, J E. G. 1998. Evolução tectono-sedimentar do Grupo Vazante no contexto da Faixa de Dobramentos Brasília. *In: Congresso Brasileiro de Geologia, 40, Belo Horizonte, Resumos, SBG*, p. 26.
- Handley, G. A., Lewis, R. W, Wilson, I. 1987. The Collection and Management of Ore Reserve Estimation Data. *In: Resources and Reserves Symposium, Sydney. The Australasian Institute of Mining and Metallurgy*, p. 27 - 30.
- Houlding, S. W. 1994. *3D Geoscience Modeling Computer Techniques for Geological Characterization*. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, 309p.
- Huijbregts, C. J. 1975. Regionalized variables and quantitative analysis of spatial data. In: Davis, J.C. & McCullagh, M.J. (ed) *Display and analysis of spatial data*. New York, John wiley. p. 38 - 53.
- Marini, O. J., Fuck, R. A., Dardenne, M. A. 1981. A evolução geotectônica da Faixa Brasília e de seu embasamento. *In: CPM/SBG, Simpósio sobre o Cráton do São Francisco e suas Faixas Marginais. Anais*, p. 100 - 115.
- Monteiro, L. V. S. 2002. Modelamento Metalogenético dos Depósitos de Zinco de Vazante, Fagundes e Ambrósia, associados ao Grupo Vazante, Minas Gerais. Tese de Doutorado em Geociências, IGc, USP, 317p.
- Sinclair, A., Blackwell, G, 2002. *Applied Mineral Inventory Estimation*. Cambridge University Press, United Kingdom, 400p.
- Royle, A. G. 1979. *Why Geostatistics? Eng. & Min J.*, **180**(5), p. 92 - 101.
- Yamamoto, J. K. 2001. *Avaliação e Classificação de Reservas Minerais*. São Paulo, Editora da Universidade de São Paulo, 226p.

Yamamoto, J.K.; Bettencourt, J.S. e Montanheiro, T.J. 2001. Análise Estatística *In*: Yamamoto, J.K. (org.). Avaliação e Classificação de Reservas Minerais. São Paulo, Edusp. p. 67-91

Yamamoto, J.K.; Rocha, M. M. 2001. Conceitos Básicos *In*: Yamamoto, J.K. (org.). Avaliação e classificação de reservas minerais. São Paulo, Edusp. p. 9-34



Yamamoto, J. K. (1971) *...*  
Yamamoto, J. K. (1971) *...*  
Yamamoto, J. K. (1971) *...*  
Yamamoto, J. K. (1971) *...*

DOAÇÃO \_\_\_\_\_  
TGC-059  
Data 02/02/12

