



**ANA MAFALDA SIMÕES RODRIGUES**

LICENCIADA

**Modelação 3D de teores de depósitos minerais  
condicionados por tipos de mineralização. O caso de  
estudo do depósito mineral do Zambujal, Minas de  
Neves-Corvo**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Geológica  
(Gorrecursos)

Orientador: Doutor José António de Almeida,  
Prof. Associado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da UNL

Júri:

Presidente: Doutor Joaquim António dos Reis Silva Simão, Prof. Auxiliar – FCT/UNL

Vogais: Doutora Sofia Verónica Trindade Barbosa, Prof. Auxiliar convidada – FCT/UNL

Doutor José António de Almeida, Prof. Auxiliar – FCT/UNL



**Setembro 2013**



**MODELAÇÃO 3D DE TEORES DE DEPÓSITOS MINERAIS CONDICIONADOS POR TIPOS DE MINÉRIO. O CASO DE ESTUDO DO DEPÓSITO MINERAL DO ZAMBUJAL, MINAS DE NEVES-CORVO.**

Copyright em nome de Ana Mafalda Simões Rodrigues, da FCT/UNL e da UNL.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



## AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho só foi conseguida com o apoio e dedicação de muitas pessoas, às quais gostaria de agradecer:

Ao meu orientador, o Professor Doutor José António de Almeida, pela possibilidade de realizar esta tese, por todos os esclarecimentos prestados, pela sua paciência, entusiasmo com o tema e disponibilidade em todas as fases deste trabalho e pela sua colaboração. E ainda, pela revisão e constante discussão deste trabalho, propondo novas ideias para melhorar o modelo.

À empresa Lundin-Mining / SOMINCOR, pela cedência dos dados que permitiram a realização deste estudo. Ao Doutor Nelson Pacheco, que foi o meu contacto, o meu obrigado pela disponibilidade. À Eng.<sup>a</sup> Ana Sofia que organizou toda a informação que eu necessitava, e ainda mais alguma.

À empresa Midland Valley pelo contrato educacional do *software* MOVE com a FCT/UNL.

Aos meus colegas e amigos, pelo apoio e incentivo. Um especial obrigado à Catarina pela solidariedade e gargalhadas.

À minha família, pelo constante interesse na minha vida académica e força que me transmitiram. Aos meus pais, que sempre fizeram os possíveis e impossíveis para que pudesse seguir os meus sonhos e por me ouvirem falar de temas e problemas nestes últimos meses, sem nada entenderem do assunto e, mesmo assim, proporem soluções *relativamente* válidas.



## RESUMO

Os depósitos minerais metálicos do jazigo de Neves-Corvo são caracterizados pela presença de mineralizações com os teores mais elevados em cobre e estanho de toda a Faixa Piritosa Ibérica. A distribuição espacial dos teores mostra forte zonalidade e segregação metálica, nomeadamente, nas mineralizações do tipo maciço e fissural.

Este trabalho tem como objectivo a proposta e experimentação de uma metodologia destinada à construção de um modelo 3D de teores em metais para o depósito mineral do Zambujal, minas de Neves-Corvo, condicional às mineralizações do tipo maciço e fissural. A metodologia tem aspectos inovadores na articulação das etapas. Os dados foram fornecidos pela empresa que explora as minas a Lundin-Mining.

O trabalho engloba três etapas principais. Na primeira etapa procede-se à construção de um modelo geométrico 3D da envolvente do depósito e dos tipos de mineralizações principais (maciço e fissural) a partir da representação das sondagens em perfis, desenho de limites e interpolação de superfícies entre perfis. O modelo geométrico vectorial é convertido para um modelo de blocos. Na segunda etapa procede-se à Simulação Sequencial da Indicatriz (SSI) das mineralizações e da rocha encaixante condicionada aos dados das sondagens e às proporções regionais de mineralizações dos tipos maciço e fissural e de rocha encaixante conforme calculadas com os dados das sondagens. Finalmente, na terceira etapa procede-se à modelação dos teores em cobre e zinco por Simulação Sequencial Directa (SSD) condicionada por histogramas locais.

Os resultados obtidos foram validados por comparação das reservas de metal, calculadas com base em médias de sondagens e os obtidos pela simulação.

**Palavras-chave:** Zambujal; Mineralizações; Modelo morfológico 3D; Simulação; Teores de metais



## **ABSTRACT**

The metallic mineral deposits of Neves-Corvo are characterized by the presence of ores with the higher levels of copper and tin of all the Iberian Pyrite Belt. The spatial distribution of grades shows strong zonality and metal segregation, particularly in the massive and fissure ore types.

This work aims the proposal and testing of a methodology for the construction of a 3D model of metal grades for the mineral deposit of Zambujal, Neves-Corvo mines conditional to the massive and fissure ores. The methodology has innovative features in the articulation of the steps. Data were provided by the mining company Lundin-Mining.

The work includes three main steps. At the first step proceeds to construct a 3D geometric model of the surrounding deposit and main types of mineralization (massive and fissure) from the representation of polls in profiles, design limits and interpolating surfaces from profiles. The geometric model vector is converted to a block model. In the second step proceeds to the sequential indicator simulation (SIS) of the mineralizations and host rock conditional on the originals data from surveys and the regional proportions of the mineralization type (massive and fissure beyond the host rock) in the two regions defined in the first model. Finally, the last step is carried out in the modelling of copper and zinc content by sequential direct simulation (SDS) conditional by local histograms.

The results were validated by comparison of metal reserves, calculated based on averages of polls and the ones obtained by simulation.

**Key-Words:** Zambujal; Mineralization; 3D Morphological Model; Simulation; Grade of metals.



# Índice Geral

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 Objectivo e Apresentação do Estudo.....	1
1.2 Organização da Tese.....	3
<b>2. METODOLOGIA E FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....</b>	<b>5</b>
2.1 Estado da Arte .....	5
2.2 Metodologia.....	6
2.3 Fundamentos Teóricos de Geoestatística .....	10
2.3.1 Variografia .....	10
2.3.2 Formalismo da Indicatriz .....	12
2.3.3 Simulação Sequencial da Indicatriz .....	12
2.3.4 Simulação Sequencial Directa.....	14
2.3.5 Análise de incerteza .....	15
<b>3. ENQUADRAMENTO DO DEPÓSITO MINERAL DO ZAMBUJAL</b>	<b>17</b>
3.1 Enquadramento Geográfico.....	17
3.2 Enquadramento Geológico Regional.....	17
3.3 Mineralização e Tipos de Minério.....	23
3.4 O Depósito Mineral do Zambujal.....	26
<b>4. MODELAÇÃO DO DEPÓSITO DO ZAMBUJAL.....</b>	<b>29</b>
4.1 Descrição dos Dados e Análise Estatística.....	29
4.1.1 Análise Estatística Univariada .....	29
4.1.2 Análise Estatística Bivariada.....	34
4.2 Modelo Determinista dos Tipos de Minério.....	35

## ÍNDICE GERAL

4.3	Modelo Estocástico dos Tipos de Minério .....	41
4.4	Modelo de Teores em Cobre e Zinco .....	50
4.5	Discussão de Resultados.....	56
4.6	Cálculo de Reservas.....	61
<b>5.</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>65</b>
<b>6.</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>69</b>

# Índice de Figuras

Figura 1.1 Vista em planta dos depósitos de Neves-Corvo e configuração da zonalidade metálica .....	2
Figura 2.1 Diagrama das etapas deste estudo.....	7
Figura 2.2 Curvas acumulativas das classes do histograma.....	9
Figura 2.3 Ilustração de uma simulação condicional de teores por DSS com histogramas locais (a) imagem binária, onde a azul ocorrem os teores baixos e a vermelho os teores altos (b) e (c) duas imagens simuladas; (d) imagem média das simulações.....	10
Figura 3.1 Enquadramento geográfico do jazigo de Neves Corvo. ....	17
Figura 3.2 Localização dos centros mineiros mais importantes da Faixa Piritosa Ibérica .....	18
Figura 3.3 Coluna estratigráfica da área do jazigo de Neves-Corvo .....	19
Figura 3.4 Localização dos depósitos e tipos de mineralizações do jazigo de Neves Corvo, em planta .....	23
Figura 3.5 Perfil geológico da massa Zambujal .....	27
Figura 4.1 <i>Box-plots</i> do cobre para os 10 tipos de minério presentes no depósito do Zambujal. ....	31
Figura 4.2 <i>Box-plots</i> do zinco para os 10 tipos de minério presentes no depósito do Zambujal. ....	31
Figura 4.3 <i>Box-plots</i> do chumbo para os 10 tipos de minério presentes no depósito do Zambujal. ....	31
Figura 4.4 <i>Box-plots</i> do estanho para os 10 tipos de minério presentes no depósito do Zambujal. ....	32
Figura 4.5 <i>Box-plots</i> do mercúrio para os 10 tipos de minério presentes no depósito do Zambujal. ....	32
Figura 4.6 <i>Box-plots</i> do arsénio para os 10 tipos de minério presentes no depósito do Zambujal. ....	32

Figura 4.7 Representação 2D do perfil nº 4 com as sondagem da área de influência (a vermelho, troços de sondagem em maciço; a verde troços de sondagem em fissural e a azul ESC).	35
Figura 4.8 Representação 2D do perfil nº 4 com as sondagem da área de influência (a vermelho, troços de sondagem em maciço; a verde troços de sondagem em fissural e a azul ESC) e limites das regiões I e II.	36
Figura 4.9 Representação 2D do perfil nº 5 com as sondagem da área de influência (a vermelho, troços de sondagem em maciço; a verde troços de sondagem em fissural e a azul ESC) e limites das regiões I e II.	37
Figura 4.10 Representação 2D do perfil nº 6 com as sondagem da área de influência (a vermelho, troços de sondagem em maciço; a verde troços de sondagem em fissural e a azul ESC) e limites das regiões I e II.	37
Figura 4.11 Conjunto dos 12 perfis digitalizados (a vermelho região I predominantemente maciço, a verde região II predominantemente fissural).	38
Figura 4.12 Representação das superfícies interpoladas dos corpos geológicos correspondentes aos minérios do tipo maciço (região I, a vermelho) e do tipo fissural (região II, a verde) e sobreposição com os contornos nos 12 perfis.	39
Figura 4.13 Representação da morfologia dos corpos geológicos sobre o modelo de blocos, com a região I (maciço) a vermelho e a região II (fissural) a verde, e sobreposição das sondagens.	40
Figura 4.14 Variogramas experimentais ajustados ao modelo esférico, com duas estruturas, para a rocha encaixante (ESC).	42
Figura 4.15 Variogramas experimentais ajustados ao modelo esférico, com duas estruturas, para a mineralização do tipo Fissural.	43
Figura 4.16 Variogramas experimentais ajustados ao modelo esférico, com uma estrutura, para a mineralização do tipo Maciço.	44
Figura 4.17 Variogramas experimentais nas direcções vertical e omnidireccional horizontal ajustados ao modelo esférico, com duas estruturas, para a rocha encaixante (ESC).	45

Figura 4.18 Variogramas experimentais nas direcções vertical e omnidireccional horizontal ajustados ao modelo esférico, com duas estruturas, para a mineralização do tipo fissural. ....	45
Figura 4.19 Variogramas experimentais nas direcções vertical e omnidireccional horizontal ajustados ao modelo esférico, com uma estrutura, para a mineralização do tipo maciço. ....	45
Figura 4.20 Modelo 3D da probabilidade de ocorrência de rocha encaixante (ESC) calculado pela média dos 200 cenários simulados. ....	46
Figura 4.21 Modelo 3D da probabilidade de ocorrência de minério de tipo fissural (F) calculado pela média dos 200 cenários simulados. ....	46
Figura 4.22 Modelo 3D da probabilidade de ocorrência de minério de tipo maciço (M) calculado pela média dos 200 cenários simulados. ....	47
Figura 4.23 Representação sequencial do modelo de mineralizações, em perfil (secção a 61 m), com as respectivas legendas. ....	48
Figura 4.24 Representação sequencial do modelo de mineralizações, em planta (secção a 41 m), com as respectivas legendas. ....	49
Figura 4.25 Variograma experimental omnidireccional do cobre ajustado à soma dois modelos de tipo esférico. ....	51
Figura 4.26 Variograma experimental omnidireccional do zinco ajustado à soma dois modelos de tipo esférico. ....	51
Figura 4.27 Representação em perfil (secção a 61 m), com respectivas legendas, relativamente aos teores de Cu. ....	52
Figura 4.28 Representação em planta (secção a 41 m), com respectivas legendas, relativamente aos teores de Cu. ....	53
Figura 4.29 Representação em perfil (secção a 61 m), com respectivas legendas, relativamente aos teores de Zn. ....	54
Figura 4.30 Representação em perfil (secção a 41 m), com respectivas legendas, relativamente aos teores de Zn. ....	55
Figura 4.31 Representação comparativa em perfil das imagens simuladas dos tipos de minério e teores em cobre e zinco. ....	57
Figura 4.32 Curvas cumulativas condicionais para o cobre por tipo de minério. ....	58

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 4.33 Curvas cumulativas condicionais para o zinco por tipo de minério. ....	58
Figura 4.34 Variogramas experimentais de uma imagem simulada de cobre e variogramas ajustados aos dados experimentais.....	59
Figura 4.35 Variogramas experimentais de uma imagem simulada de zinco e variogramas ajustados aos dados experimentais.....	60
Figura 4.36 Análise univariada para a densidade da rocha encaixante (ESC).....	62
Figura 4.37 Análise univariada para a densidade das mineralizações do tipo fissural (F). ....	62
Figura 4.38 Análise univariada para a densidade das mineralizações do tipo maciço (M). ....	62

## Índice de Tabelas

Tabela 1.1 – Tipos de mineralizações e minério, com respectivos teores de corte ( <i>cut-off</i> ). Adaptado de Pacheco et al., 1998. ....	2
Tabela 1.2 – Códigos dos tipos de minério. ....	3
Tabela 4.1 – Estatísticas da análise univariada .....	30
Tabela 4.2 – Análise estatística bivariada (coeficiente de Pearson). ....	34
Tabela 4.3 – Características geométricas da malha de blocos .....	39
Tabela 4.4 – Probabilidades <i>a priori</i> para os vários tipos de minério por região do modelo. .	40
Tabela 4.5 – Tabela discriminativa das probabilidades <i>a priori</i> construídas com base nos dados experimentais e os calculados como resultado das simulações. ....	47
Tabela 4.6 – Tabela comparativa de valores médios de cobre e zinco calculados com os dados experimentais e com os resultados da simulação. ....	61
Tabela 4.7 – Síntese das reservas em minério e metal para o cobre no depósito mineral do Zambujal. ....	63
Tabela 4.8 – Síntese das reservas em minério e metal para o zinco no depósito mineral do Zambujal. ....	63



# **1. INTRODUÇÃO**

## **1.1 OBJECTIVO E APRESENTAÇÃO DO ESTUDO**

O principal objectivo deste trabalho é a experimentação de uma metodologia que integra, de forma inovadora, a simulação de teores em metal de um depósito mineral condicionada a um modelo geométrico vectorial da envolvente. A metodologia foi aplicada ao depósito do Zambujal, do jazigo Neves-Corvo, localizado na Faixa Piritosa Ibérica. Para tal, utilizaram-se dados das sondagens de fundo e de superfície fornecidos pela empresa Lundin-Mining / SOMINCOR que explora a Mina. A informação dispensada das sondagens é composta por ficheiros com as coordenadas X, Y e Z do início das sondagens, azimute e inclinação por troço, litologias e tipos de minério por intervalo e vários teores discriminados, em média, por suporte de 2 metros (nalguns troços o suporte é maior).

O jazigo de Neves-Corvo é conhecido pela presença de mineralizações com teores anormalmente elevados de cobre e estanho e caracterizado por forte zonamento e segregação metálica (Figura 1.1). Essa zonalidade é caracterizada por duas afinidades metálicas: entre o cobre e o estanho e do zinco com o chumbo, bem como pela relação antagónica entre estes dois grupos (Carvalho & Ferreira, 1994).

Os tipos de minérios encontrados nas várias massas mineralizadas de Neves-Corvo são classificados pelos teores de cobre, zinco e estanho. Na Tabela 1.1 mostra-se, de forma simplificada, a relação dos tipos de minério com os teores destes metais.

No depósito do Zambujal as sondagens atravessam dois tipos de mineralizações principais, maciço e fissural, mas cada tipo subdivide-se ainda em vários subtipos no total 10 (Tabela 1.2). As mineralizações do tipo maciço dividem-se em seis subtipos (5C, 5Z, MC, ME, MP e MZ) e as do tipo fissural em três subtipos (FC, FE e FZ;), sendo estas designações atribuídas conforme os teores. Para além destes nove têm-se ainda em consideração a rocha encaixante (ESC), ou seja, aquela onde os teores não são considerados rentáveis. Refira-se que as sondagens reportam análises químicas de 14 elementos na massa do Zambujal.

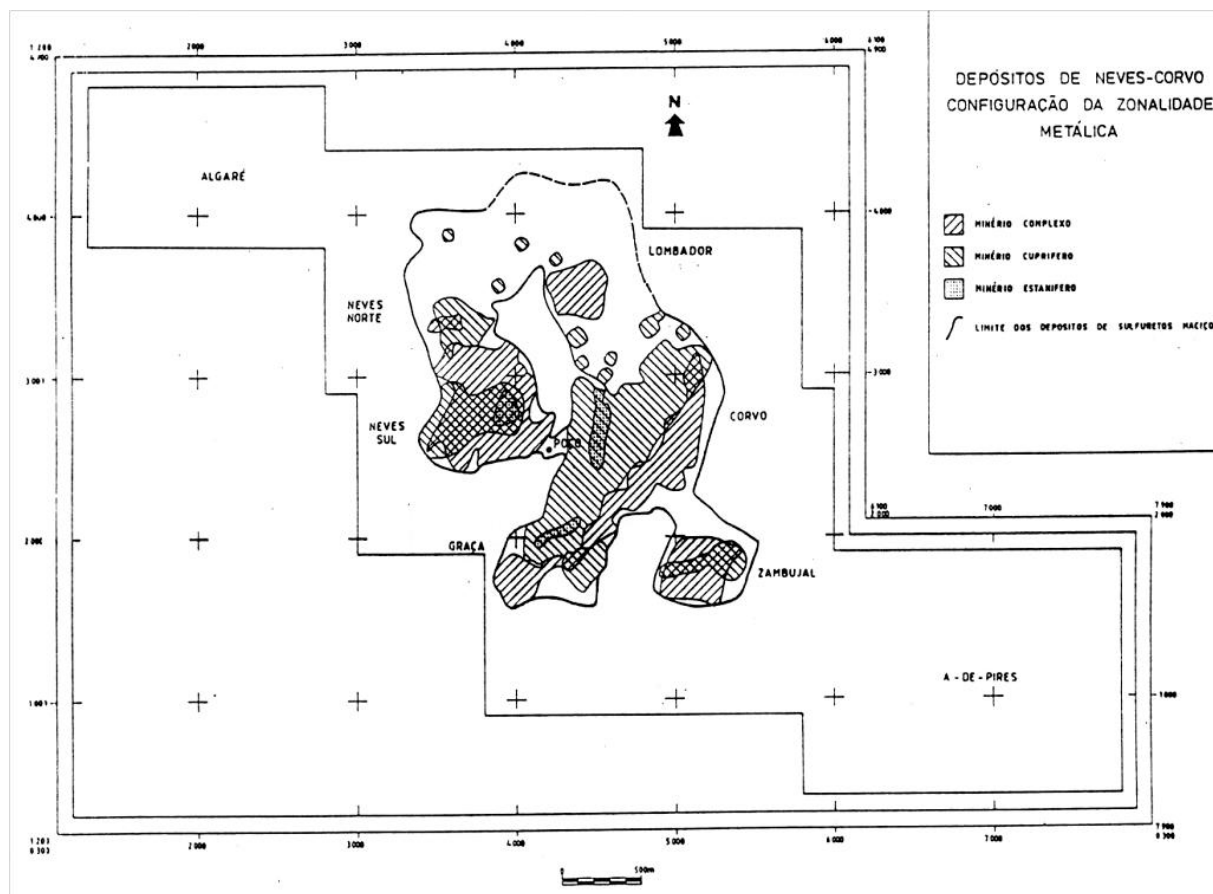


Figura 1.1 Vista em planta dos depósitos de Neves-Corvo e configuração da zonalidade metálica (fonte: Carvalho & Ferreira, 1994).

Tabela 1.1 – Tipos de mineralizações e minério, com respectivos teores de corte (*cut-off*). Adaptado de Pacheco et al., 1998.

Tipos de Mineralização	Teores de corte	Tipo de minério
R – Rubané	Cobre > 10% Cu	MS
M - Sulfureto Maciço	Estanho > 1% Sn	RT/MT/FT
F – Fissural	Cobre > 2% Cu	RC/MC/FC
C- Cobre	e < 1% Sn	
T – Estanho	Zinco > 3,3% Zn	RZ/MZ/FZ
S- Cobre e Estanho		
Z- Zinco	Estéril < 1% Sn,	-
E - Estéril	< 2% Cu e < 3,3% Zn	

Para simplificar e seguir a organização conferida aos dados originais, optou-se por atribuir alguns códigos a determinadas designações (tipos de minérios). Os códigos usados nas páginas seguintes encontram-se sintetizados na Tabela 1.2.

Tabela 1.2 – Códigos dos tipos de minério.

<b>Tipo de Minério</b>	
<b>Código</b>	<b>Descrição</b>
5C (MCZ)	Maciço de cobre e zinco
5Z (MZP)	Maciço de zinco e chumbo
ESC	Encaixante (Grauvaque e Xistos)
FC	Fissural de cobre
FE	Fissural estéril
FZ	Fissural de zinco
MC	Maciço de cobre
ME	Maciço estéril
MP	Maciço de chumbo
MZ	Maciço de zinco

## 1.2 ORGANIZAÇÃO DA TESE

A tese encontra-se organizada em cinco capítulos. No primeiro capítulo é apresentado o enquadramento geral do estudo e dos dados de partida, com os respectivos objectivos a atingir. O segundo capítulo consiste na especificação das metodologias usadas no desenvolvimento deste trabalho, assim como os fundamentos teóricos da geoestatística.

O capítulo três engloba o enquadramento geológico, com a descrição mais detalhada das sequências geológicas da região em estudo, bem como uma introdução às mineralizações e tipos de minério do jazigo de Neves-Corvo e, principalmente, aos tipos de minérios que se identificaram na massa do Zambujal.

O capítulo quatro, dedicado ao caso de estudo propriamente dito, inicia-se com a descrição dos dados originais e os estudos estatísticos iniciais a que estes dados estiveram sujeitos para um melhor entendimento do que esperar da modelação. Ainda neste capítulo encontra-se a descrição do procedimento da modelação dividido em três grandes etapas: o modelo determinista dos tipos de minério (com divisão de duas grandes regiões - maciço e fissural), o modelo estocástico dos tipos de minério e o modelo dos teores em cobre e zinco, bem como a

## CAPÍTULO 1

descrição das ferramentas utilizadas para a obtenção dos resultados e as imagens finais. Apresenta-se a interpretação dos resultados bem como uma breve crítica da metodologia utilizada do ponto de vista dos resultados e o cálculo de reservas para o depósito mineral em estudo.

No capítulo cinco apresentam-se as considerações finais e no seis as referências bibliográficas.

## 2. METODOLOGIA E FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 2.1 ESTADO DA ARTE

A geoestatística visa caracterizar a dispersão espacial e espacio-temporal das grandezas que definem a quantidade e a qualidade de recursos naturais, como os recursos geológicos, cujos atributos se manifestem uma determinada estrutura no espaço e/ ou tempo. É composta por um conjunto de ferramentas da estatística, para quantificar a continuidade espacial da grandeza em causa, e por modelos de interpolação espacial tendo por base a variabilidade da sua estrutura e modelos de simulação que quantificam a incerteza associada ao fenómeno espacial (Soares, 2006).

Este trabalho visa a caracterização de um modelo tridimensional dos teores de cobre e zinco para um depósito mineral, recorrendo, assim, à simulação de vários cenários equiprováveis. Como antecedentes, são vários os estudos que focam a mesma finalidade, uma vez que os métodos geoestatísticos podem ser aplicados em diversas áreas de estudo dentro do campo das Ciências da Terra, mas a modelação de recursos geológicos está ligada ao seu surgimento, na década de 60, pela escola francesa *Centre de Geostatistique de Fontainebleau da École des Mines*, fundada por G. Matheron. Do trabalho desta equipa apareceram os primeiros modelos para abordar os problemas associados a recursos geológicos como fenómenos espaciais, bem como a origem da noção de variograma como medida de estudo da continuidade espacial (Soares, 2006). Em Portugal, e nos anos 70 do século passado, J. Quintino Rogado usou as ferramentas da geoestatística para a caracterização e quantificação de jazigo metálicos em Angola.

A geoestatística tem sofrido várias fases de evolução dependendo dos diferentes domínios da sua aplicação. A segunda grande evolução esteve associada ao campo de estudo do ambiente, durante o final dos anos 70 e o início dos anos 80 do século passado (Soares, 2006).

Trabalhos mais recentes desenvolvem estudos para a caracterização de depósitos minerais como é o caso de (Charifo, 2008; Charifo et al., 2013) com a caracterização da morfologia e dos teores do depósito mineral de fosfato Farim-Saliquinhé na Guiné-Bissau, com a proposta de um metodologia que utiliza os algoritmos geoestatísticos de estimação por krigagem (normal e com deriva externa) e simulação sequencial Gaussiana

(SSG) e a construção de um modelo geológico 3D de um subsector das mineralizações auríferas de Casas Novas, Montemor-o-Novo (Matias, 2010; Matias et al., 2010).

Igualmente um campo com destaque actualmente na geoestatística é a caracterização de reservatórios petrolíferos, consistindo na elaboração de modelos de reservatórios de petróleo para efeitos de melhoria da estimativa das reservas, análise de incerteza e tomada de decisões sobre o desenvolvimento do campo (Almeida, 1999; 2010; Marques, 2011).

### 2.2 METODOLOGIA

Tendo em consideração os objectivos deste trabalho, consideraram-se três etapas principais: a primeira em que se realizou a modelação morfológica tridimensional do jazigo com duas regiões a partir da interpretação de perfis; a segunda etapa em que se utilizou os dados dos tipos de minério referidos nas sondagens para obter um modelo condicional para as mineralizações, por simulação sequencial da indicatriz (SSI) condicionada por probabilidades *a priori* de ocorrência condicional por região e, a terceira etapa, onde se obteve o modelo de teores por simulação, condicionada às imagens simuladas por SSI dos tipos de mineralização ou à rocha encaixante e ainda pelos teores de cobre e zinco das sondagens.

A primeira etapa realizou-se essencialmente através do *MOVE® - structural modelling and analysis software* da *Midland Valley* (digitalização de perfis, interpolação de superfícies, transformação da estrutura vectorial em matricial), enquanto que para a segunda e terceira etapas usou-se o *software geoMS*, com os programas *geoVAR* e *geoMOD* para a modelação dos variogramas, e *geoVIEW* para a visualização dos resultados. Na SSI e SSD foram utilizadas versões modificadas baseadas nas versões paralelizadas dos programas de simulação sequencial apresentados por Nunes & Almeida (2010).

A metodologia utilizada encontra-se esquematizada no diagrama da Figura 2.1.

O trabalho experimental iniciou-se com a análise estatística dos dados cedidos pela Lundin-Mining, para estudar os elementos mais representativos e a sua localização. Assim, realizou-se uma análise estatística univariada para os 14 elementos químicos identificados pelas sondagens (Cu, Pb, Zn, S, Fe, Ag, Hg, Sn, As, Sb, Bi, Au, Se, In),

focando a análise na sua representatividade, média, mediana, valores extremos, variância e coeficiente de variação, quartis inferior e superior e assimetria de distribuição. Ainda se estudou a correlação entre elementos através do cálculo do coeficiente de Pearson, para a estatística bivariada.

Posteriormente passou-se para a modelação morfológica da massa do Zambujal, sendo necessário o estudo de perfis geológicos, obtidos pela projecção das coordenadas transformadas das sondagens com os tipos de minério atravessados. Os ficheiros de dados iniciais incluíam as coordenadas da boca das sondagens, mais a orientação (azimutes e inclinações) por troço, que foram transformadas para coordenadas rectangulares.

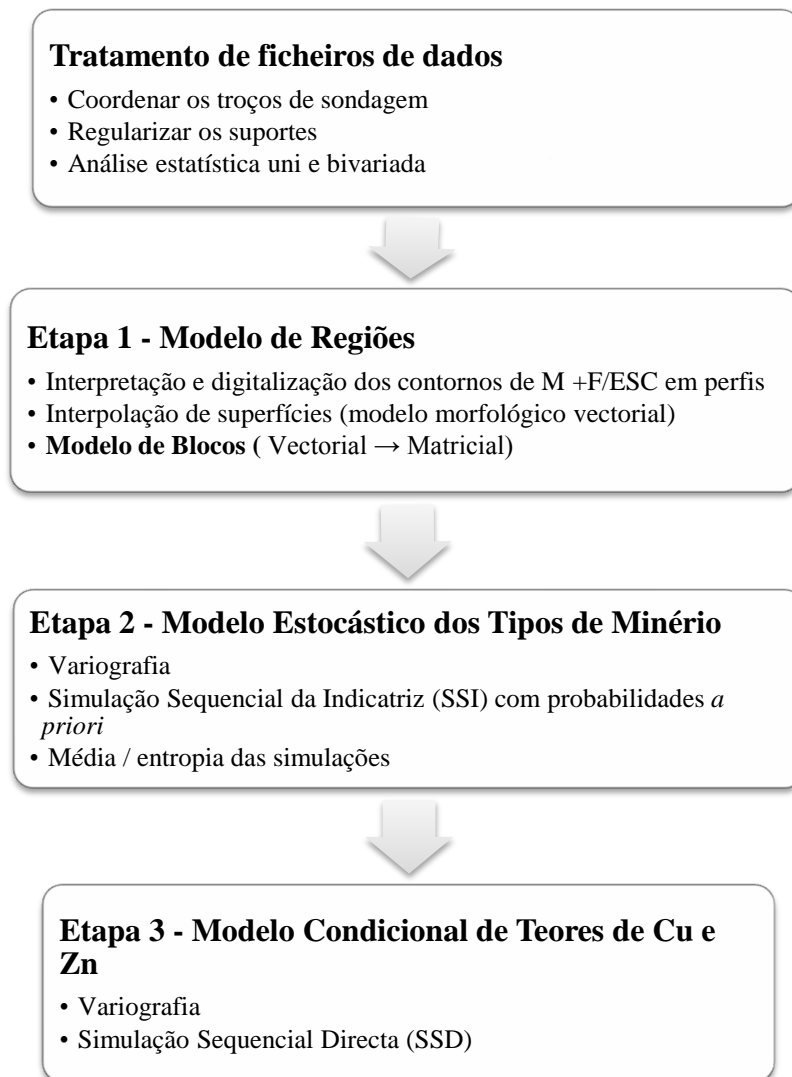


Figura 2.1 Diagrama das etapas deste estudo

A selecção do número ideal de perfis a considerar para a modelação geométrica (etapa 1) foi feita tendo em conta a área da massa Zambujal e ajustando os perfis de modo a obter a maior quantidade de informação possível. A interpretação geológica em cada perfil foi realizada manualmente, numa primeira tentativa, e só posteriormente através de um suporte digital. De referir que esta etapa é subjectiva (Almeida et al., 1993), podendo ter várias interpretações; optou-se por escolher uma interpretação simplista em duas regiões, pelo que o detalhe da morfologia será acrescentado na segunda etapa da SSI.

Por perfil, delimitaram-se quatro limites estruturais (linhas poligonais abertas) correspondentes ao topo e à base de cada região (I - maciço e II - fissural + rocha encaixante). As linhas homólogas foram interpoladas entre perfis constituindo as quatro superfícies correspondentes ao topo e à base de cada região. Refira-se que entre as regiões I e II não existe volume em vazio, pelo que sempre que há sobreposição das regiões I e II as linhas poligonais foram digitalizadas como coincidentes.

De seguida criou-se uma malha de blocos regulares que envolve todo o volume do depósito do Zambujal. A malha tem as dimensões aproximadas de 600 m na direcção do eixo X, 610 m no eixo Y e 360 m de espessura (eixo Z), com dimensão unitária de 5 x 5 x 5 m (ou 125 m<sup>3</sup>). O final desta etapa consistiu na transformação do modelo morfológico vectorial numa estrutura matricial a que foram atribuídos os códigos 1, 2 e *nodata*.

A segunda etapa consistiu na elaboração de um modelo 3D de alta resolução visando a discriminação das mineralizações do tipo maciço e fissural e da rocha encaixante, tendo sido necessário recorrer à variografia e SSI. A análise da continuidade espacial em contexto geoestatístico é realizada pela variografia da indicatriz, simples ou multifásica, (Soares, 2006) por direcção, neste caso para as direcções das sondagens. A simulação das mineralizações por SSI foi condicionada às proporções regionais de cada tipo de minério retiradas da intercepção do modelo das regiões com as sondagens (probabilidades *a priori*). Calculou-se ainda a média e a entropia (incerteza local) das simulações dos tipos de minério.

Na terceira e última etapa procedeu-se à simulação condicional dos teores por SSD com histogramas locais, condicionada às simulações dos tipos de minério (M-maciço, F-fissural ou ESC-rocha encaixante). Foi simulada uma imagem de teores por imagem resultado da SSI.

Na simulação dos teores por SSD, a amostragem é feita ao histograma dos teores de cada região ao invés de utilizar um histograma global. Quando os teores são discriminados por uma imagem de uma variável categórica condicional, por exemplo de tipos de minério, podem-se fazer simulações independentes, para cada tipo de minério e juntar os resultados ou então simular tudo em conjunto com histogramas e médias locais. Quando se fazem simulações separadas e se juntam os resultados, não existe continuidade de teores na interface entre os tipos de minério, o que neste caso de estudo não está de acordo com o modelo conceptual de transições suaves. Então é preferível fazer uma única simulação para os teores de todas as categorias mas impondo médias locais e histogramas locais.

Considere-se o exemplo de duas categorias com valores associados e onde existe forte segregação ou zonalidade (Figura 2.2). Estas duas categorias representam-se por uma classe 1, com teores mais baixos, e uma classe 2 com teores mais altos. A simulação condicional dos valores pode ser ilustrada na figura 2.3, com uma imagem binária, duas imagens simuladas e uma imagem média de um conjunto de simulações.

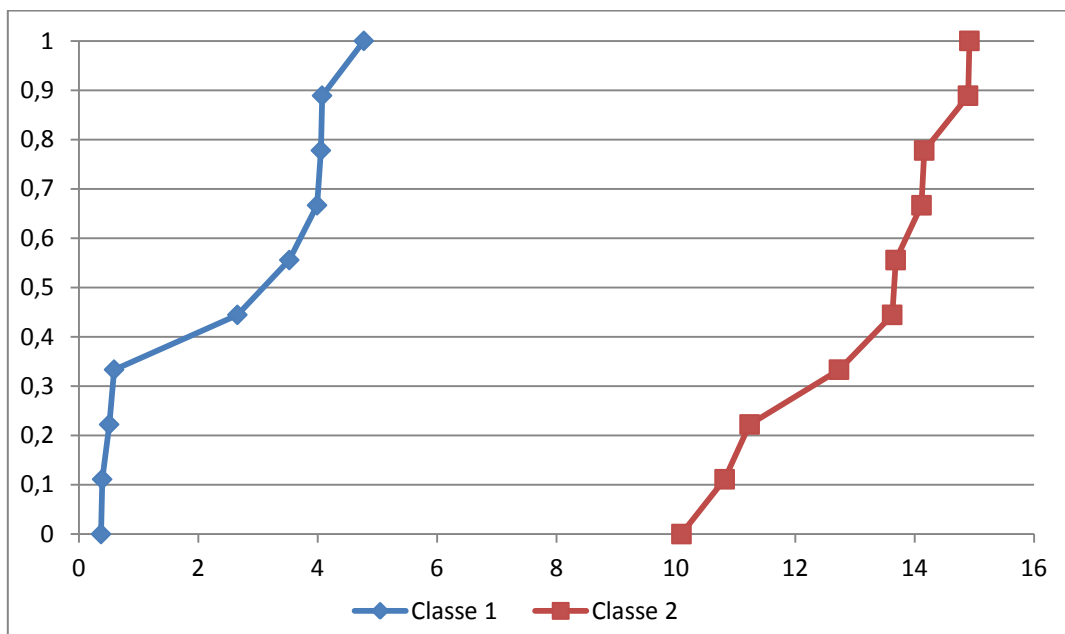


Figura 2.2 Curvas acumulativas das classes do histograma.

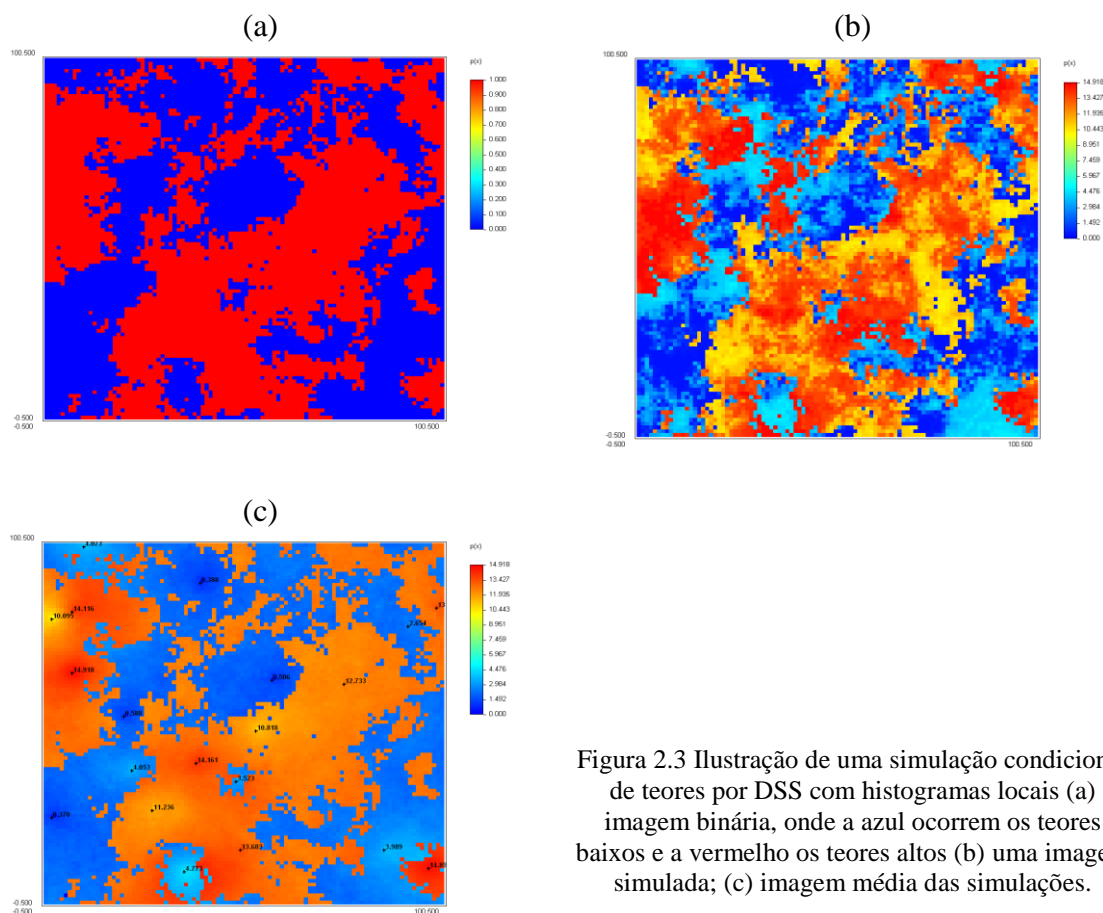


Figura 2.3 Ilustração de uma simulação condicional de teores por DSS com histogramas locais (a) imagem binária, onde a azul ocorrem os teores baixos e a vermelho os teores altos (b) uma imagem simulada; (c) imagem média das simulações.

## 2.3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE GEOESTATÍSTICA

### 2.3.1 VARIOGRAFIA

Existem vários instrumentos geoestatísticos de medida da continuidade espacial das características de um recurso natural ou de um fenômenos natural. O elemento mais privilegiado para a avaliação da continuidade espacial é o biponto (par de pontos separados de  $h$ ), que permite avaliar a variação da continuidade espacial em diferentes direcções (Soares, 2006).

Tomando uma dada característica quantitativa de  $(x)$ , os diagramas de representação dos pares de pontos  $Z(x)$  vs  $Z(x+h)$ , calculados com base no biponto para diferentes valores de  $h$ , compõem os estatísticos que contêm informação mais elaborada sobre a continuidade espacial de  $Z(x)$ . A representação de tais diagramas resulta em nuvens de dispersão, que quanto mais dispersas forem, menor será a correlação entre as amostras. Contudo, é

necessário sintetizar essas nuvens de dispersão de forma a melhorar a sua interpretação e permitir a visualização da evolução a que estão sujeitas com  $h$  (Soares, 2006).

Se a cada nuvem for aplicada a média do quadrado das diferenças entre  $(x)$  e  $z(x + h)$ , a continuidade espacial de  $Z(x)$  pode ser determinada pelo estimador do variograma, para os diferentes valores assumidos por  $h$ :

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{\alpha=1}^{N(h)} [Z(x_{\alpha}) - Z(x_{\alpha} + h)]^2,$$

onde  $(h)$  é o número de pares de pontos para cada valor de  $h$ .

Como se pode efectuar a mesma análise para várias direcções espaciais, fica-se com a noção da variação do atributo  $Z(x)$  no espaço.

No presente trabalho a ferramenta de estimação utilizada para a análise da continuidade espacial das variáveis foi o variograma (também denominado de semivariograma).

A partir do momento em que os valores dos variogramas para as diferentes direcções são calculados, com base num conjunto de amostras de uma área  $A$ , é necessário proceder à sua modelação através de uma função geral e representativa. Ou seja, ajustar os variogramas através de uma curva atenuada média, função de um número reduzido de parâmetros que quantifique a continuidade espacial de  $Z(x)$  (Soares, 2006). Este ajustamento do variograma experimental por um modelo teórico é condicionado pelo conhecimento prévio do fenómeno espacial em estudo; para além da função utilizada para a interpolação dos pontos experimentais permitir que o variograma seja positivo.

Como tal, existe um número limitado de funções que podem ser aplicadas, que proporcionam uma cobertura generalizada das situações de dispersão dos fenómenos espaciais: modelos esférico, exponencial, Gaussiano e de potência. Neste trabalho foram utilizados apenas os dois primeiros.

Tanto o modelo esférico como o exponencial dependem de dois parâmetros:

- a. Patamar  $C$  – limite superior para o qual tendem os valores do variograma com o aumento dos valores de  $h$ ,
- b. Amplitude ( $h = a$ ) – distância a partir da qual os valores de  $\gamma(h)$  cessam o seu crescimento e as variáveis deixam de ser correlacionáveis entre si.

O modelo esférico tem a seguinte expressão (Soares, 2006):

$$\gamma(h) = \begin{cases} C \left[ 1,5 \frac{h}{a} - 0,5 \left( \frac{h}{a} \right)^3 \right] & \text{para } h \leq a \\ C & \text{para } h > a \end{cases}$$

O modelo exponencial tem a seguinte expressão (Soares, 2006):

$$\gamma(h) = C [1 - e^{-3h/a}]$$

Neste modelo, o variograma tende assintoticamente para o valor do patamar  $C$  e a amplitude  $a$  é a distância em que o modelo atinge 95% do patamar :  $\gamma(h) = 0,95C$ .

### 2.3.2 FORMALISMO DA INDICATRIZ

A realização de modelos geoestatísticos permite obter a probabilidade estimada de um qualquer ponto na área de estudo, pertencer a uma região, com base na amostragem na vizinhança desse ponto.

Para tal, é necessária a construção de uma variável indicatriz, obtida pela atribuição de valores 1 e 0 a uma variável  $Z(x)$  em estudo mediante um parâmetro, como por exemplo, um determinado tipo de mineralização  $m$ , em que serão classificados com 1 as amostras correspondentes ao tipo de mineralização pretendido e 0 para as restantes:

$$I(x_i) = \begin{cases} 1 & \text{se } z(x_i) = m \\ 0 & \text{se } z(x_i) \neq m \end{cases}$$

### 2.3.3 SIMULAÇÃO SEQUENCIAL DA INDICATRIZ

A SSI de uma variável  $Z(x)$  baseia-se no procedimento normal da simulação sequencial, cujas funções de distribuição condicionais são estimadas pelo formalismo da indicatriz (Soares, 2006).

O princípio da simulação sequencial é relativamente simples e baseia-se na aplicação da relação de Bayes em passos sequenciais sucessivos. Assim, a simulação será feita por um

número de sucessões equivalente ao número de valores que se pretende simular, com um condicionamento crescente face à informação existente nos pontos a simular.

A relação de Bayes pode ser generalizada para um conjunto de variáveis (Soares, 2006):

$$F(Z_1, Z_2, Z_3, \dots, Z_N) = F(Z_1) F(Z_2|Z_1) F(Z_3|Z_2, Z_1) \dots F(Z_N|Z_1, Z_2, Z_3, \dots, Z_{N-1})$$

Considere-se a lei de distribuição conjunta de  $N$  variáveis aleatórias e  $n$  valores condicionantes experimentais iniciais  $F(N) = (Z_1, Z_2, Z_3, \dots, Z_N|(n))$ . O processo de simulação de  $F(N)$  pode ser resumido nas seguintes etapas:

- i) Simulação de um valor  $z_1$  considerando a função distribuição cumulativa  $F(Z_1|(n))$ . Uma vez realizada a simulação de  $z_1$ , o valor obtido é adicionado ao conjunto de informação condicionante, para os subsequentes passos de simulação, passando  $n$  a  $n + z_1$ ;
- ii) Simulação de um novo valor  $z_2$  a partir da distribuição condicional  $F(Z_2|(n + 1))$ , tendo por base os  $(n + 1)$  valores condicionantes. Actualização dos dados condicionantes para  $(n + 2) = (n + 1) + Z_2$ ;

Repetição do processo sequencial até se proceder à simulação das  $N$  variáveis.

De salientar que, as  $N$  variáveis aleatórias dependentes  $Z_1, Z_2, Z_3, \dots, Z_N$ , podem representar a mesma grandeza espacialmente referenciada em  $N$  nós da área a simular. Se se considerar os  $n$  valores condicionantes iniciais correspondentes aos valores experimentais, então:

$$F(N) = (Z(x_1), Z(x_2), Z(x_3), \dots, Z(x_N)|(n)).$$

Este método de simulação sequencial assenta no conhecimento das  $N$  funções cumulativas condicionais:

$$\begin{aligned} & Prob\{Z(x_1) < z | (n)\} \\ & Prob\{Z(x_2) < z | (n + 1)\} \\ & Prob\{Z(x_3) < z | (n + 2)\} \\ & \dots \\ & Prob\{Z(x_N) < z | (n + N - 1)\} \end{aligned}$$

E é precisamente o conhecimento destas funções que limita a aplicação prática destes algoritmos de simulação sequencial. Segundo (Soares, 2006), usa-se a krigagem da indicatriz como ferramenta para a estimativa das funções em causa, dando origem à SSI. A SSI garante o condicionamento aos variogramas e histogramas dos dados experimentais.

### 2.3.4 SIMULAÇÃO SEQUENCIAL DIRECTA

A simulação sequencial directa (SSD) não necessita de nenhuma transformação da variável original, o que representa uma vantagem em relação à SSI e SSG, uma vez que estas necessitam de uma transformação da variável original num conjunto de variáveis indicatriz para o caso da SSI ou numa variável Gaussiana para a SSG (Soares, 2001; 2006). Esta transformação pode dificultar a estimação dos variogramas, quando o número de variáveis indicatriz (classes do histograma) é elevado, no caso da SSI. No caso da SSG os variogramas da variável original são difíceis de reproduzir particularmente se a distribuição for extremamente assimétrica (Soares, 2006; Charifo et al., 2013).

A SSD recorre à utilização das médias e variâncias locais para re-amostrar a lei de distribuição cumulativa global ou, neste caso, local. Ou seja, são escolhidos intervalos de  $Z(x)$  da lei de distribuição condicional local ao tipo de minério  $m$   $F_{z|m}(z)$  com o objectivo de construir uma nova função  $F'_{z|m}(z)$  com intervalos centrados na média local estimada por krigagem simples  $[z(x_0)]^*$  e com amplitude proporcional à variância condicional local estimada pela variância de estimação da krigagem simples  $\sigma_{ks}^2(x_0)$ .

Um dos métodos para definir as  $F'_{z|m}(z)$  engloba a utilização de uma função auxiliar de lei de distribuição Gaussiana.

Para tal, admite-se uma transformada normal  $\varphi$  dos valores originais  $z(x)$ ,

$$y(x) = \varphi(z(x)), \text{ com } G(y(x)) = F_{z|m}(z(x))$$

Segundo (Soares, 2006), após o cálculo da transformada uniforme dos valores  $z(x)$ , a SSD pode ser sintetizada pela seguinte sequência de etapas:

- a. Definir um percurso aleatório sobre o conjunto de nós  $x_0$  de uma malha regular a ser simulada.

- b. Definir o intervalo de  $F_{z|m}(z)$  a ser re-amostrado com base na distribuição Gaussiana:

$$G\left([y(x_0)]^*, \sigma_{ks}^2(x_0)\right), \text{ em que } [y(x_0)]^* = \varphi([z(x_0)]^*)$$

- c. Geração de um valor simulado  $z_s(x_0)$ :

1) Geração de um valor  $p$  de uma distribuição uniforme  $U(0,1)$ .

2) Geração de um valor  $y^s$  de  $G\left([y(x_0)]^*, \sigma_{ks}^2(x_0)\right)$ :

$$y^s = G^{-1}\left([y(x_0)]^*, \sigma_{ks}^2(x_0), p\right)$$

3) Calcular o valor simulado  $z_s(x_0) = \varphi^{-1}(y^s)$ .

- d. Retorno a 1 até todos os nós estarem simulados.

### 2.3.5 ANÁLISE DE INCERTEZA

A incerteza associada à variável em estudo, num dado ponto  $x_0$  pode ser definida como sendo a probabilidade do valor naquele ponto exceder ou ser menor do que um determinado valor de corte, ou a probabilidade do valor  $x_0$  estar contido entre os dois quartis. No caso da incerteza estar associada a um conjunto de pontos em simultâneo, então esta define-se como a probabilidade de um conjunto de pontos exceder simultaneamente um dado valor limite (Soares, 2006). Para a avaliação deste tipo de incerteza, denominada incerteza espacial segundo o mesmo autor, realiza-se através de modelos geoestatísticos de simulação, os quais geram um conjunto de imagens equiprováveis do fenómeno espacial em estudo, reproduzindo os mesmos estatísticos de variabilidade espacial quantificados pelas amostras ou observações.

Neste estudo avalia-se a incerteza do modelo, medida pela entropia de distribuição das probabilidades locais (Almeida, 1999), que se pode definir para um conjunto de  $K$  modalidades (onde  $p_k^*(x)$  é a média das 200 imagens simuladas em cada célula  $x$  pela seguinte fórmula:

$$H(x) = - \sum_{k=1}^K [\ln p_k^*(x)] p_k^*(x)$$

A entropia assume valores entre 0 (blocos em que não haja incerteza) e  $\ln K$  associada com a distribuição uniforme  $p_k^*(x) = 1/k$ . A entropia local apresenta um intervalo entre 0 e 1 e é dada por:

$$H_R(x) = \frac{H(x)}{\ln K}$$

### 3. ENQUADRAMENTO DO DEPÓSITO MINERAL DO ZAMBUJAL

#### 3.1 ENQUADRAMENTO GEOGRÁFICO

A mina de Neves-Corvo situa-se, aproximadamente, a 220 km a SE (sudeste) de Lisboa e 15 km de Castro Verde e abrange as freguesias de Santa Bárbara de Padrões e Senhora da Graça de Padrões, respectivamente, nos concelhos de Castro Verde e Almodôvar, distrito de Beja, no Baixo Alentejo (Figura 3.1). O couro mineiro ocupa uma área com, cerca de, 295 ha.

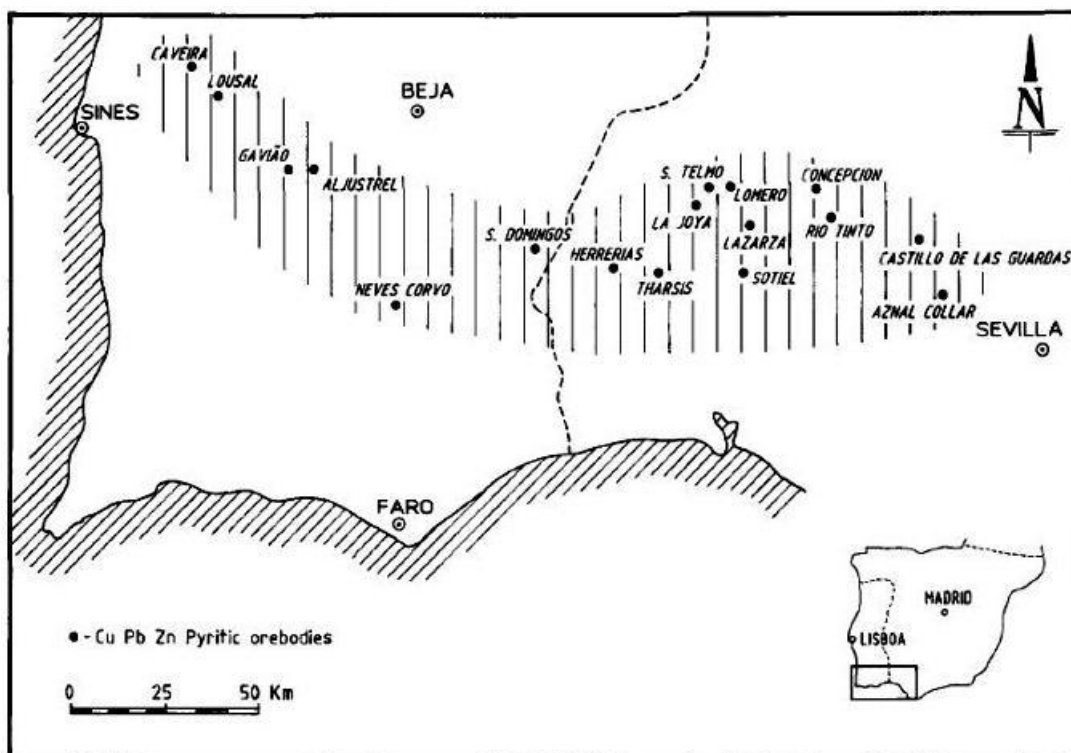


Figura 3.1 Enquadramento geográfico do jazigo de Neves Corvo (fonte: Gaspar & Pinto, 1991).

#### 3.2 ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO REGIONAL

O jazigo de Neves Corvo insere-se no anticlinal Neves Corvo-Rosário e é um depósito mineral de sulfuretos maciços vulcanogénicos polimetálicos, situado na orla SE da província metalogenética designada por Faixa Piritosa Ibérica (Figura 3.2), com uma largura máxima de 60 km e que se estende por 250 km, desde o norte de Grândola, em Portugal, até próximo de Sevilha, em Espanha (Pacheco et al., 1998). Por sua vez, a FPI insere-se numa unidade geotectónica mais ampla que, compreendendo formações metassedimentares e vulcânicas de

idade paleozóica, evidencia características estruturais e paleogeográficas específicas - Zona Sul Portuguesa (Gaspar, 2006).

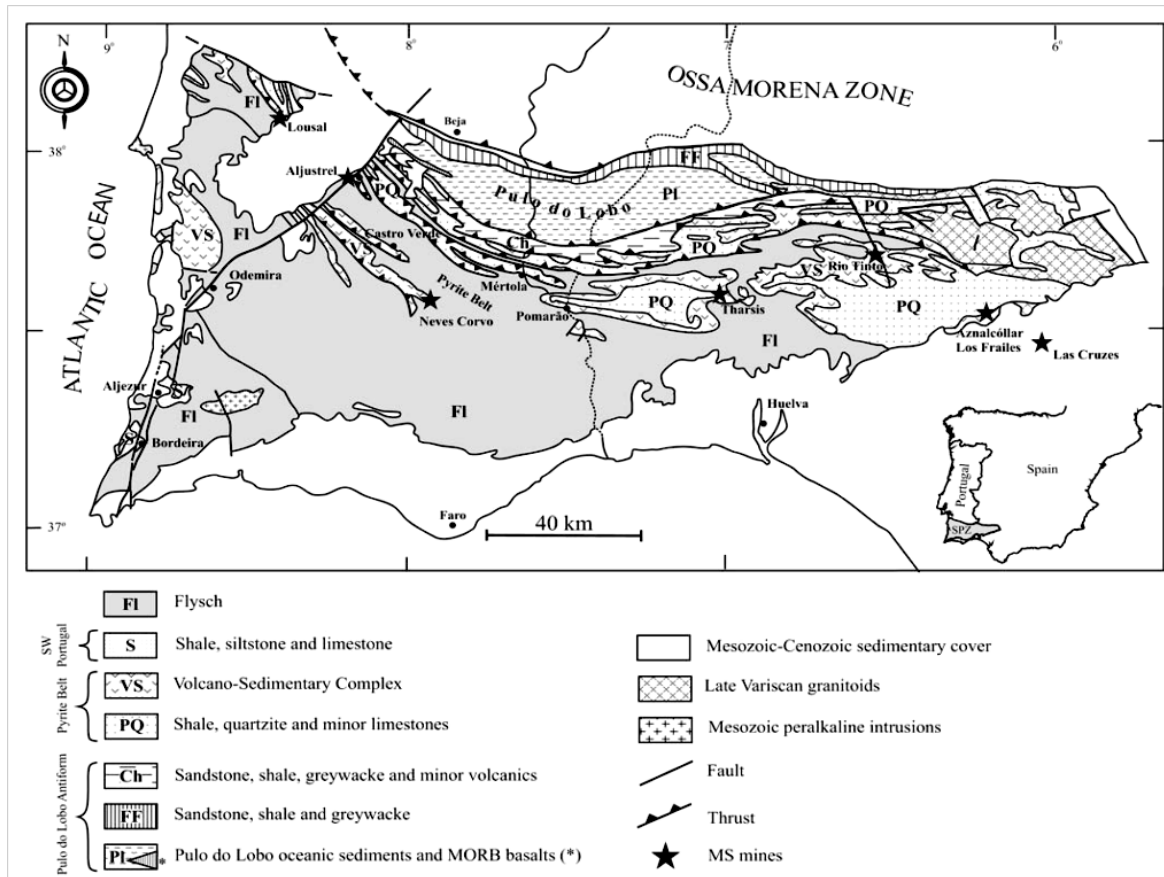


Figura 3.2 Localização dos centros mineiros mais importantes da Faixa Piritosa Ibérica (fonte: Oliveira et al., 2004).

Este jazigo é caracterizado do ponto de vista geológico como um conjunto formacional diferenciado que se desenvolve do Devónico superior ao Carbónico inferior, constituído por três seqüências geológicas principais que, da base para o topo, apresentam as seguintes características (Figura 3.3):

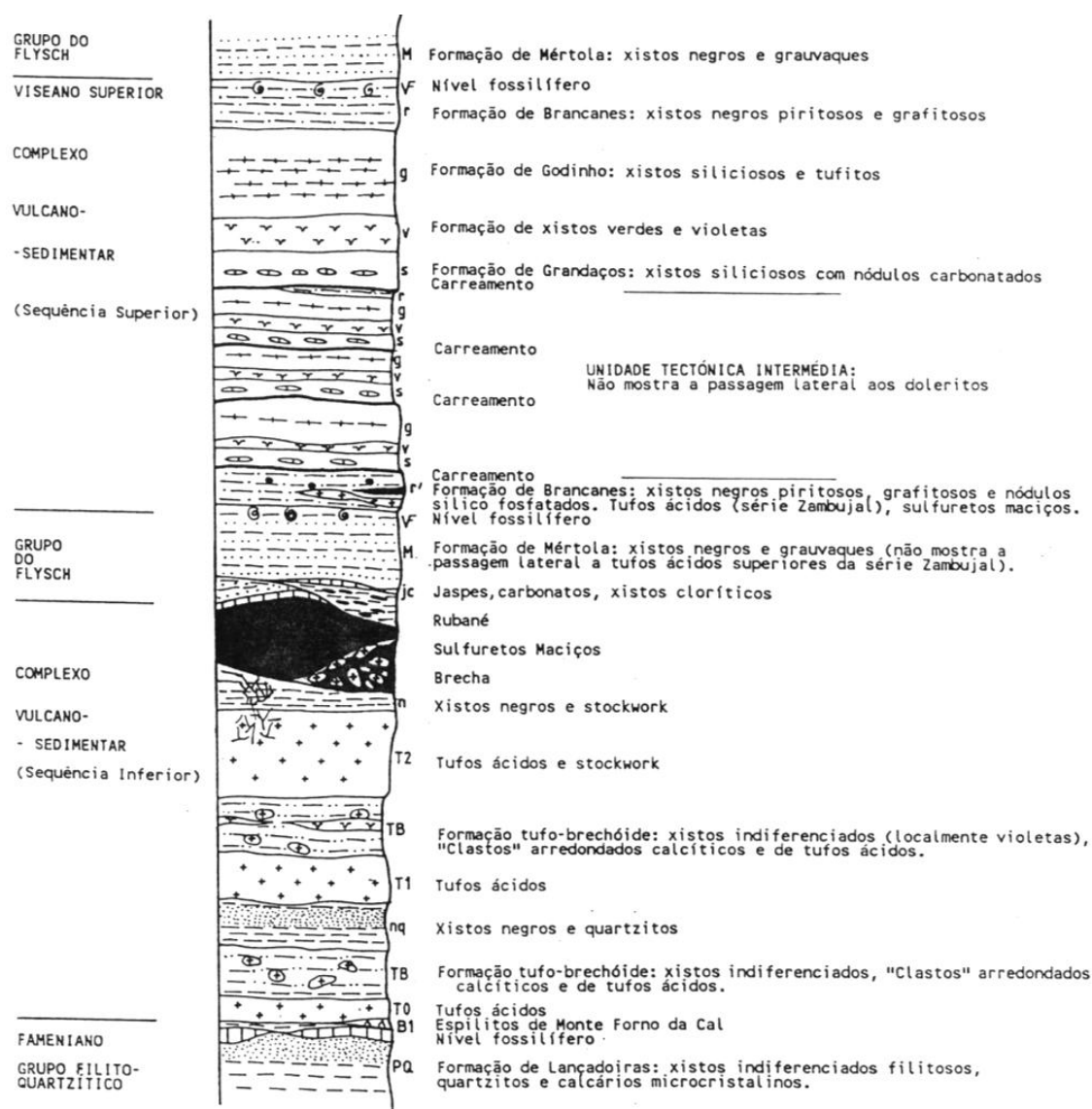


Figura 3.3 Coluna estratigráfica da área do jazigo de Neves-Corvo (fonte: Carvalho & Ferreira, 1994).

### Grupo Filito-Quartzítico (PQ)

Aflora a cerca de 3 km a noroeste da mina e é constituído por uma sequência monótona de xistos indiferenciados de composição filitosa, contendo no topo um nível de quartzitos impuros, e calcários lenticulares microcristalinos associados (Carvalho & Ferreira, 1994).

Os quartzitos apresentam-se em sequências distintas por critérios de polaridade e granularidade, com espessura variada, chegando a atingir vários decímetros. Estas bancadas encontram-se frequentemente intercaladas por xistos filitosos escuros a negros.

O nível de calcários que se encontra no topo dos quartzitos apresenta fósseis datados do Fameniano superior (Boogard, 1967), idade que marcará o início da actividade vulcânica, de grande escala, nesta área (Carvalho & Ferreira, 1994).

### **Complexo Vulcano-Sedimentar (CVS)**

Em concordância com a sequência anterior, encontra-se o CVS, datado do Carbónico inferior, mais precisamente do Tournaisiano a Viseano inferior, que compreende séries de rochas vulcânicas, de natureza ácida e básica (lavas e rochas piroclásticas), associadas a centros vulcânicos distintos de natureza bimodal. As variações laterais de fácies são frequentes e, geralmente, assinaladas pela presença de tufitos (Gaspar, 2006).

Em afloramento apresenta-se em duas sequências distintas:

#### Sequência Inferior ou Autóctone

Situa-se na envolvente imediata do PQ e caracteriza-se pela presença de uma importante manifestação vulcânica básica – os Espilitos de Monte Forno de Cal – sem representatividade nos afloramentos a sudeste da estrutura, pelo menos na área de influência do jazigo de Neves Corvo.

Na área de afloramento não é possível diferenciar as rochas vulcânicas ácidas cartografadas que aparecem alternadas com xistos filito-siliciosos, ao contrário da área da mina onde estas estão bem definidas segundo 3 níveis diferentes (T0, T1, T2) de piroclastos finos de composição filito-siliciosa. Estes níveis estão separados, da base para o topo, por xistos alternados de tom cinzento-escuro a negro, por vezes de cor mais variada, esverdeada ou mesmo violeta (Figura 3.4). Estes xistos caracterizam-se pela presença de clastos arredondados de composição calcítica e fragmentos de tufos, que se designam como Formação Tufos-Brechóides (Carvalho & Ferreira, 1994).

O nível de quartzitos impuros em bancadas na ordem da dezena de metros, entre T0 e T1, distintos dos quartzitos Devónicos por nunca apresentarem o nível de calcários microcristalinos, permite definir a sucessão estratigráfica desta sequência até aos xistos negros do muro da mineralização.

De referir ainda que esta sequência apresenta uma sucessão estratigráfica normal, aparentemente sem intervenção de tectónica carreactiva, apesar da sua espessura ser bastante variável e de se registar, algumas vezes, ausência de algumas unidades.

#### Sequência Superior ou Alóctone

A sequência estratigráfica superior, que se estende até à área da mina, caracteriza-se pela presença de xistos argilo-carbonosos a siliciosos, tufitos dominantes e, localmente, rochas vulcânicas.

Esta sequência inicia-se no tecto dos sulfuretos maciços com um nível de chertes cinzentos esbranquiçados a avermelhados, de origem hidrotermal-sedimentar e de espessura decimétrica a métrica. Os chertes encontram-se brechificados e preenchidos por carbonatos. Associada aos chertes e aos carbonatos está a presença de xistos cloríticos que, por sua vez, contêm quartzo microgranular e, por vezes, carbonatos finamente disseminados ou em leitos milimétricos.

A presença de raros níveis de grauvaques indica influência de deposição turbidítica (Carvalho & Ferreira, 1994). Estes grauvaques são geralmente classificados como pertencentes à Formação de Mértola do Grupo do Flysch, sendo, aparentemente, contemporânea com as formações vulcano-sedimentares da sequência superior do CVS, originada pelo ressurgimento tardio de nova actividade vulcânica, durante um período em que o Flysch já estava a depositar (Carvalho & Ferreira, 1994). São de espessura variável e chegam a desaparecer para dar origem às rochas vulcânicas ácidas da série Zambujal.

No topo desta unidade encontram-se xistos negros com piritosos e grafitosos com nódulos silico-fosfatados, intercalados com tufos ácidos sericito-clorito-siliciosos e xistos siliciosos cinzentos esverdeados com impregnação oolítica carbonatada.

A sua designação, como sub-nível da Formação Brancanes, deve-se à natureza da evolução lateral, que a oeste do sector mineiro mostra a sua sobreposição em contacto directo, que, devido à sua semelhança composicional, deixa de ser possível diferenciá-los. A presença de um segundo nível de xistos e grauvaques no topo desta formação reforça as observações da sua passagem lateral para uma intercalação entre grauvaques (Carvalho & Ferreira, 1994).

Ao contrário do contacto basal com a Formação de Mértola, considerado normal independentemente de se revelar laminado em quase todas as áreas da mina e sondagens, já o contacto superior é considerado como a primeira evidência do carreamento da unidade que se lhe sobrepõe (Carvalho & Ferreira, 1994).

Tipicamente, a sucessão estratigráfica desta unidade é composta, da base para o topo, por:

- Formação de Grandãos (xistos siliciosos e xistos negros alternados com nódulos carbonatados);

- Formação de Xistos Verdes e Violeta;
- Formação de Godinho (xistos siliciosos e tufitos, por vezes em bancadas maciças);
- Formação de Brancanes (xistos negros piritosos e grafitosos, com níveis fossilíferos, nomeadamente com *goniatites*, datadas do Viséano superior).

O topo da Formação de Brancanes marca a transição ao Grupo do Flysch.

### **Grupo do Flysch (GF)**

A Formação de Mértola do Grupo do Flysch é a unidade mais recente, com características sedimentares, composta por alternâncias monótonas de xistos argilosos e grauvaques. A sua transição desde a sequência anterior é contínua, através da Formação de Brancanes (Carvalho & Ferreira, 1994).

No geral, estas três sequências principais encontram-se metamorfizadas regionalmente até à fácies dos xistos verdes (baixo grau).

A estrutura dominante do jazigo é o anticlinal central Neves Corvo-Rosário, de orientação NW-SE. Este tem dobramento ligeiramente assimétrico, com o flanco NE alongado, inclinando entre 25° a 30° e o flanco SW geralmente mais curto com inclinações variáveis até 70°.

O eixo da estrutura inclina suavemente para SE, sendo possível neste local verificar um abatimento por blocos, em "tecla de piano", devido a desligamentos perpendiculares à estrutura e rejeitos diferenciais desde o Devónico até ao Carbónico Inferior (Carvalho & Ferreira, 1994).

As massas mineralizadas, situam-se em ambos os flancos do anticlinal Neves Corvo-Rosário, tiveram a sua morfologia foi afectada por fenómenos de tectónica tardia, representados sob a forma de falhas sub-verticais de orientações preferenciais variáveis, onde se destacam N-S a N20E, N40E a N60E, N30W e E-W. Estas falhas foram parcialmente reactivadas a partir de falhas antigas, tendo sido determinantes na génese dos sulfuretos (Carvalho & Ferreira, 1994; Relvas et al., 2002).

### 3.3 MINERALIZAÇÃO E TIPOS DE MINÉRIO

No jazigo de Neves Corvo são actualmente explorados cinco depósitos minerais, contando-se ainda com a recente descoberta do sexto – Semblana. Por ordem cronológica de descoberta são Corvo, Graça, Neves (Norte e Sul), Zambujal e Lombador (Figura 3.4).

Estes depósitos têm forma lenticular e características únicas na Faixa Piritosa Ibérica, nomeadamente elevados teores de cobre e estanho e forte zonalidade. São compostas por sulfuretos maciços polimetálicos, com paragénese tipicamente constituída por pirite, calcopirite, blenda, galena, estanite, tenantite-tetraedrite, entre outros sulfossais, e ainda óxidos, com especial atenção para a cassiterite (Carvalho & Ferreira, 1994).

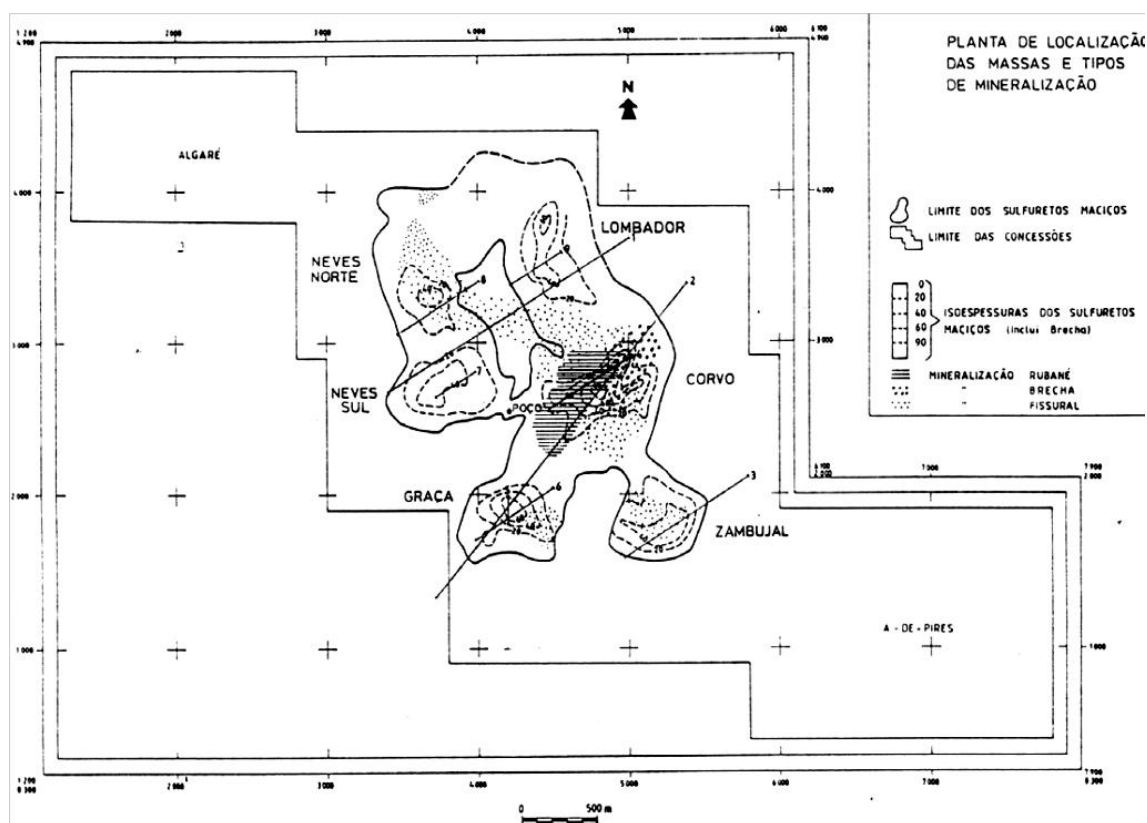


Figura 3.4 Localização dos depósitos e tipos de mineralizações do jazigo de Neves Corvo, em planta (fonte: Carvalho & Ferreira, 1994).

A zonalidade vertical existente nas diversas massas de sulfuretos maciços é caracterizada pela presença das zonas ricas em cobre na sua base, sobrepostas por sulfuretos ricos em zinco, se estes existirem, seguidos de pirite maciça no topo. O estanho aparece sempre associado com

as zonas mais ricas em cobre e, quando ocorrem elevadas concentrações de cassiterite, esta aparece na base da zona cuprífera. Ou seja, no geral, a zonalidade metálica vertical é, da base para o topo, caracterizada por estanho, cobre, zinco e pirite maciça (Pacheco et al., 1998).

É de referir, que para além das elevadas concentrações em Cu, Sn e Zn, de interesse económico, estão presentes tanto elementos valorizantes, como a Ag e potencialmente o In, como elementos penalizantes, como é o caso do As, Hg e Sb.

Os depósitos mineralizados do Complexo Mineiro de Neves Corvo podem dividir-se segundo os tipos de minérios, de acordo com a sua composição, textura e granulometria, sendo que, da base para o topo, abrangem (Pacheco et al., 1998; Pacheco et al., 2003; Gaspar, 2006):

### **Minério fissural e de *stockwork***

A mineralização tipo *stockwork* ocorre preferencialmente numa rede complexa e anastomosada de veios e filonetes, desenvolvidos em rochas metassomatizadas de natureza tufítica, tornando-se os sulfuretos cada vez mais abundantes com a proximidade do contacto com os sulfuretos maciços. Esta mineralização é constituída essencialmente por calcopirite + pirite ± cassiterite ± estanite. Os fenómenos metassomáticos principais são a cloritização, sericitização, silicificação e, localmente, carbonatização.

O minério fissural encontra-se associado a níveis tufíticos grosseiros, sem alteração hidrotermal significativa. A associação principal típica é calcopirite + pirite + cassiterite ± estanite ± kosterite, sendo que a mineralização preenche estruturas distensivas subverticais geometricamente distintas das que caracterizam a zona de ascensão dos fluidos mineralizados (*stockwork*). Este minério é designado por fissural estanífero (FT), se tiver mais do que 1% de estanho, ou fissural cuprífero (FC), caso contenha mais de 2% de cobre, ou ainda fissural zincífero (FZ), para teores de zinco superiores a 3,3%.

### **Minério brechóide**

O minério brechóide ocorre fundamentalmente no extremo NE da massa Corvo, sobre o minério *stockwork*. Este minério pode, ainda, ser distinguido em três subtipos, consoante a natureza do cimento e dos clastos que o compõem:

- a) Clastos maioritariamente de pirite, de variada dimensão, por vezes muito fracturados, cimentados por calcopirite;
- b) Clastos predominantemente constituídos por calcopirite, de pequena dimensão, de matriz piritosa;
- c) Fragmentos vulcânicos cimentados por pirite  $\pm$  calcopirite.

Sendo que a calcopirite é mais abundante que a pirite; a esfalerite e galena são raras e encontram-se esporádicas ocorrências de cassiterite e estanita.

#### **Minério maciço**

Os sulfuretos maciços são o tipo de mineralização mais abundante em Neves Corvo, sendo caracterizada por sulfuretos de grão geralmente muito fino, observando-se pontualmente estruturas do tipo “*graded bedding*” e “*slumps*”, e com associação mineralógica principal de pirite + calcopirite  $\pm$  galena  $\pm$  esfalerite. Sendo que é possível a ocorrência de cassiterite e estanita em pequenas quantidades, quando associadas com a calcopirite. A tetraedrite/tennantite e a kosterite ocorrem, por vezes, em quantidades significativas.

Quando a pirite é o principal sulfureto presente, com teores de Pb-Zn, Cu e Sn inferiores ao teor de corte (4%, 2% e 1%, respectivamente), o minério é considerado estéril, designado por maciço estéril (ME). A calcopirite pode, contudo, ser o único componente de determinados níveis e se isso se verificar, desde que o teor em Cu seja superior a 2% e o de Sn inferior a 1%, o minério tem a designação de maciço cuprífero (MC). Por outro lado, a cassiterite é o mineral de estanho predominante, enquanto que a estanita pode conter algum Zn ou Cu, aproximando-se assim da composição ideal da kosterite e da mawsonite, respectivamente. Se o teor em Sn for considerado elevado (acima de 5%), o minério passa a ser denominado por maciço estanífero (MT). Se os teores em Sn e Cu forem superiores a 1% e 10%, respectivamente, o minério designa-se por maciço cupro-estanífero (MS). Estes dois últimos tipos ocorrem preferencialmente em zonas adjacentes a falhas.

Ainda no minério maciço foram identificados níveis relativamente ricos em prata, mercúrio e em metais de alta tecnologia. A prata, com teores variáveis entre 30 e 70 ppm, aparece normalmente associada a certos níveis de calcopirite que, por vezes, contêm arsenopirite – rara no contexto geral da paragénese característica do minério maciço.

Se o teor de Hg associado à presença de tetraedrite superar os 300 ppm, o minério designa-se por MH e é tratado separadamente na lavaria, uma vez que este metal é penalizante dos concentrados metálicos para efeitos metalúrgicos.

A esfalerite ocorre sob a forma de pequenos cristais disseminados, ou formando leitões milimétricos no maciço estéril, sendo também relativamente comuns as estruturas em pente de esfalerite no seio da calcopirite. Do ponto de vista químico, este mineral é geralmente rico em ferro (marmatite), podendo conter também quantidades significativas de cádmio (pribramite). As concentrações anómalas em índio, germânio e gálio surgem também associadas aos níveis ricos em esfalerite. A galena aparece geralmente no núcleo de zonas enriquecidas em esfalerite. O minério de Pb-Zn, com um teor conjunto destes elementos superior a 3,3%, sem Sn e com teores de Cu inferiores a 0,5%, é designado por maciço polimetálico (MZ).

### **Minério rubané**

O termo rubané é utilizado para designar as alternâncias de bandas centimétricas, paralelas, de xistos negros cloríticos e de sulfuretos, predominantemente calcopirite. Este ocorre no topo do minério maciço nas massas mineralizadas da Graça e do Corvo.

O rubané cuprífero (RC), para teores em Cu superiores a 2%, caracteriza-se por bandas de xisto negro alternadas com bandas de calcopirite, em que os sulfuretos presentes são preferencialmente a calcopirite ± pirite ± hausmanite ± cobaltite. O rubané estanífero (RT), cuja designação se atribui quando os teores de Sn estão próximos de 5%, caracteriza-se pela associação cassiterite + calcopirite ± pirite ± estanita ± kosterite. Por último, o rubané zincífero (RZ) caracteriza-se por bandas de xisto negro e sulfuretos ricos em esfalerite, com mais de 3,3% de zinco.

## **3.4 O DEPÓSITO MINERAL DO ZAMBUJAL**

O depósito do Zambujal localiza-se na extremidade SE do anticlinal principal, afectada por esta dobra, localmente com características de dobra-falha e rotação do eixo de estrutura até quase E-W.

### 3. ENQUADRAMENTO DO DEPÓSITO MINERAL DO ZAMBUJAL

Este depósito tem menores dimensões quando comparado com os restantes do jazigo de Neves Corvo. Aquando a fase de avaliação com sondagens de superfície (em 1998), esperava-se para o Zambujal um comprimento de 550 metros por 600 metros de largura e espessura máxima de 53 metros, entre os 350 e os 480 metros de profundidade.

A mineralização é cuprífera e zincífera (de baixo teor), onde predomina a pirite maciça. O topo dos sulfuretos maciços é assinalado pela presença do nível dos jaspes e carbonatos, seguido da formação de Mértola ou de rochas vulcânicas ácidas (Figura 3.5). A mineralização fissural, localmente cuprífera, ocorre nos xistos negros e nas rochas vulcânicas do muro, afectados por cloritização e carbonatização intensas (Pacheco et al., 1998; 2003).

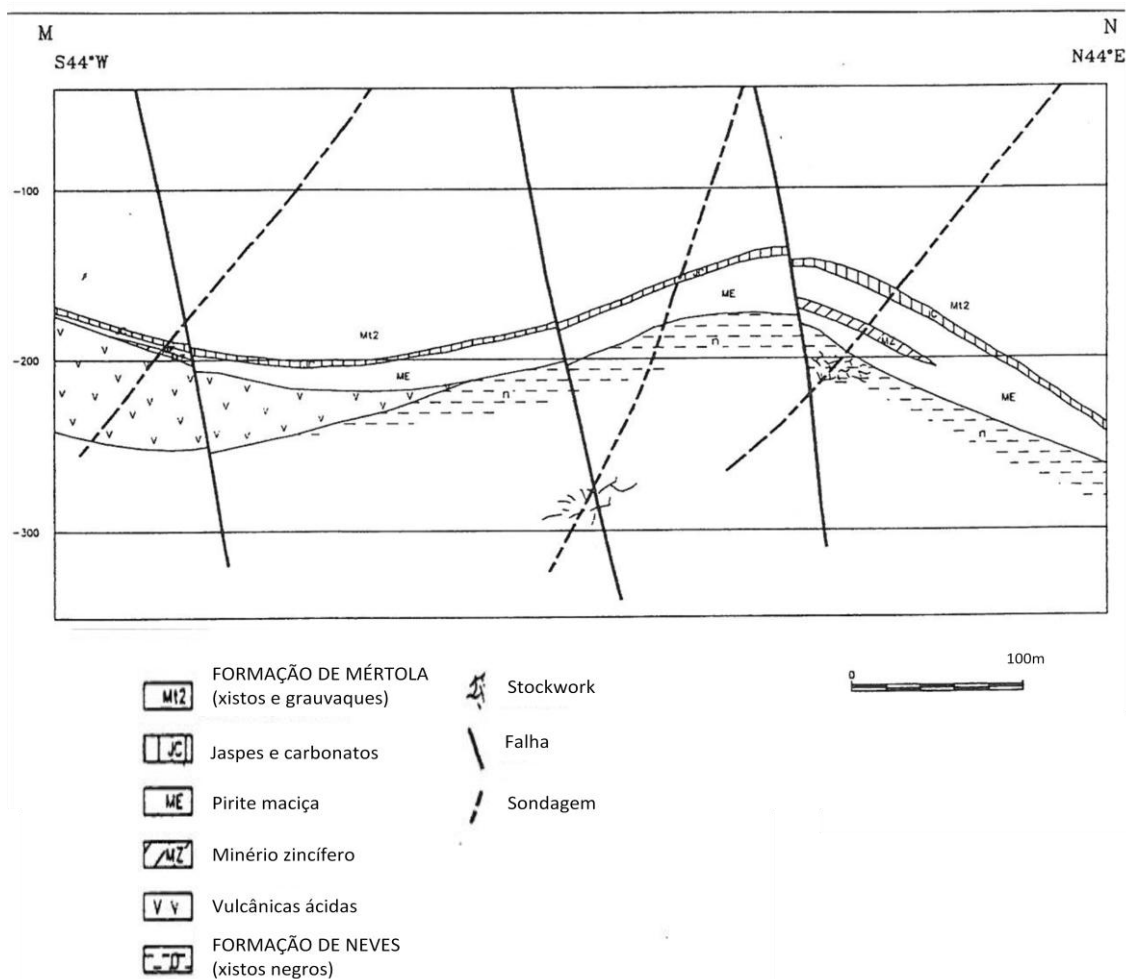


Figura 3.5 Perfil geológico da massa Zambujal (fonte: Pacheco et al., 1998).



## **4. MODELAÇÃO DO DEPÓSITO DO ZAMBUJAL**

### **4.1 DESCRIÇÃO DOS DADOS E ANÁLISE ESTATÍSTICA**

Os dados utilizados neste trabalho foram fornecidos pela empresa Lundin-Mining que explora o jazigo do Zambujal. Estão em ficheiros no formato EXCEL® e incluem informação da sondagem referentes à profundidade inicial e final da furação, o número de identificação da amostra, e os teores obtidos na sondagem para 14 elementos químicos (Cu, Pb, Zn, S, Fe, Ag, Hg, Sn, As, Sb, Bi, Au, Se, In), densidade e códigos referentes ao tipo de rocha e ao tipo de minério correspondentes.

As variáveis mais importantes e analisadas em todos os suportes são o Cu, Pb e Zn, (com 15770 valores); também o S, Fe, Sn, As, Sb e o Bi têm representatividade semelhante, no sentido em que foram amostrados em quase todos os suportes.

#### **4.1.1 ANÁLISE ESTATÍSTICA UNIVARIADA**

O trabalho iniciou-se com a análise estatística univariada, que tem como objectivo caracterizar estatisticamente as variáveis do ponto de vista individual. Utilizou-se a representação em *box-plot* por tipo de minério das variáveis mais importantes para o estudo, assim como à análise de estatísticas de posição central (média e mediana) e dispersão (valores mínimos e máximos, variância, coeficiente de variação, quartis e amplitude entre quartis) e assimetria (coeficiente de Skewness). O *box-plot* é uma das melhores representações para comparar estatísticas de posição de uma variável condicionada a outra variável ou então de várias variáveis em simultâneo. Para auxiliar a comparação de teores, no anexo I encontram-se histogramas cumulativos condicionais dos teores para todos os tipos de minério.

Os elementos que foram analisados para todos os 10 tipos de minérios da massa do Zambujal são os elementos mais amostrados e que simultaneamente constituem o metal a concentrar na exploração mineira (Cu, Zn, Pb e Sn) mais aqueles cuja presença têm o papel de penalizantes (Hg e As). Na tabela 4.1 mostram-se as estatísticas univariadas de todos os elementos disponíveis. Nas figuras 4.1 a 4.6 mostram-se os *box-plot* condicionais por tipo de minério respectivamente para o Cu, Zn, Pb, Sn, Hg e As. De notar que os dados do Hg e As encontram-se em ppm e os restantes em percentagem (%). No anexo II podem ser observados os estatísticos univariados e os respectivos histogramas e *box-plots* destas 14 variáveis.

Tabela 4.1 – Estatísticas da análise univariada

	<b>Cu (%)</b>	<b>Pb (%)</b>	<b>Zn (%)</b>	<b>S (%)</b>	<b>Fe (%)</b>	<b>Ag (ppm)</b>	<b>Hg (ppm)</b>
<b>#</b>	15770	15770	15770	15527	15510	4128	3464
<b>Média</b>	0,97	0,31	1,2	24,43	27,97	34,8	127
<b>Mediana</b>	0,34	0,11	0,08	20,74	30,59	26,1	97
<b>Min</b>	0,05	0,02	0,04	0,17	2,33	2	1
<b>Máx</b>	33,36	15	23,04	56,32	66,2	560	1140
<b>Variância</b>	7,256	0,429	5,463	428,936	206,565	1,202,821	22771,25
<b>Coef. variação</b>	2,777	2,113	1,948	0,848	0,514	0,997	1,188
<b>Q1</b>	0,09	0,03	0,08	2,86	14,49	15	16
<b>Q3</b>	0,61	0,29	1,09	46,12	41,24	45	180
<b>IQR</b>	0,52	0,26	1,01	43,26	26,75	30	164
<b>Assimetria</b>	6,46	5,68	3,24	0,06	-0,31	4,54	2,62

	<b>Sn (%)</b>	<b>As (ppm)</b>	<b>Antimônio (ppm)</b>	<b>Bismute (ppm)</b>	<b>Au (ppm)</b>	<b>Selênio (ppm)</b>	<b>Índio(ppm)</b>
<b>#</b>	15562	15502	15311	15311	398	10735	10735
<b>Média</b>	0,04	3145	264	53	0,16	104	47,5
<b>Mediana</b>	0,03	1516	83	27	0	33	34
<b>Min</b>	0,02	167	42	14	0	17	34
<b>Máx</b>	1,13	99915	35208	5374	1,53	5740	569
<b>Variância</b>	0,002	25343621	1449247	25085,9	0,044	53289,01	695,07
<b>Coef. variação</b>	1,118	1,601	4,56	2,988	1,311	2,22	0,555
<b>Q1</b>	0,02	333	83	27	0	17	34
<b>Q3</b>	0,03	4021	83	27	0,27	33	67
<b>IQR</b>	0,01	3688	0	0	0,27	16	33
<b>Assimetria</b>	5,72	5,52	15,78	16,37	1,6	7,23	7,45

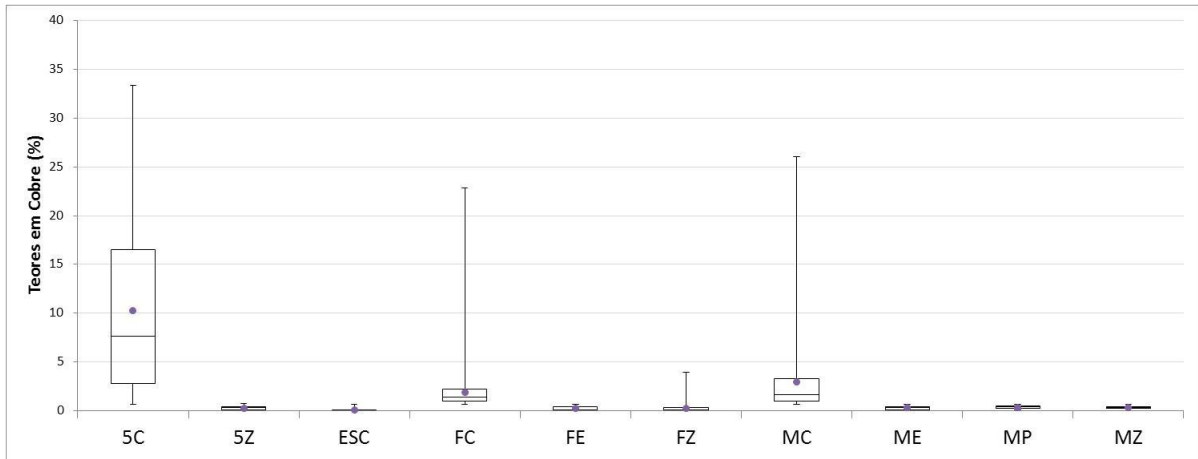


Figura 4.1 *Box-plots* do cobre para os 10 tipos de minério presentes no depósito do Zambujal.

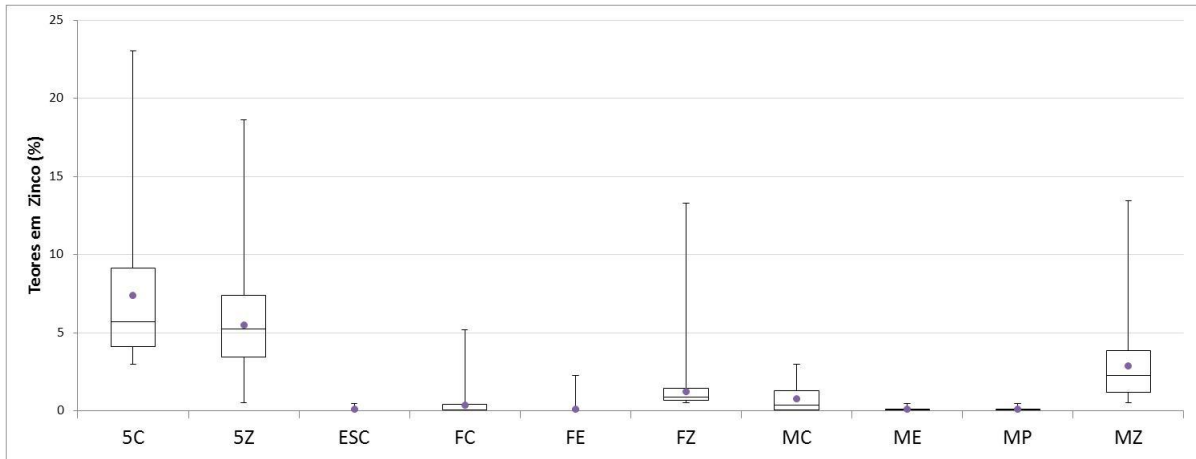


Figura 4.2 *Box-plots* do zinco para os 10 tipos de minério presentes no depósito do Zambujal.

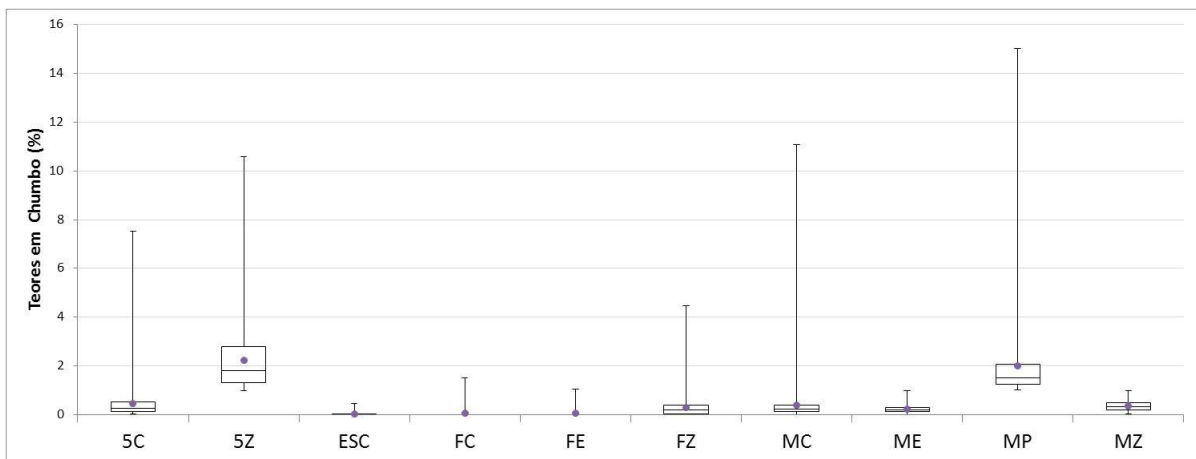


Figura 4.3 *Box-plots* do chumbo para os 10 tipos de minério presentes no depósito do Zambujal.

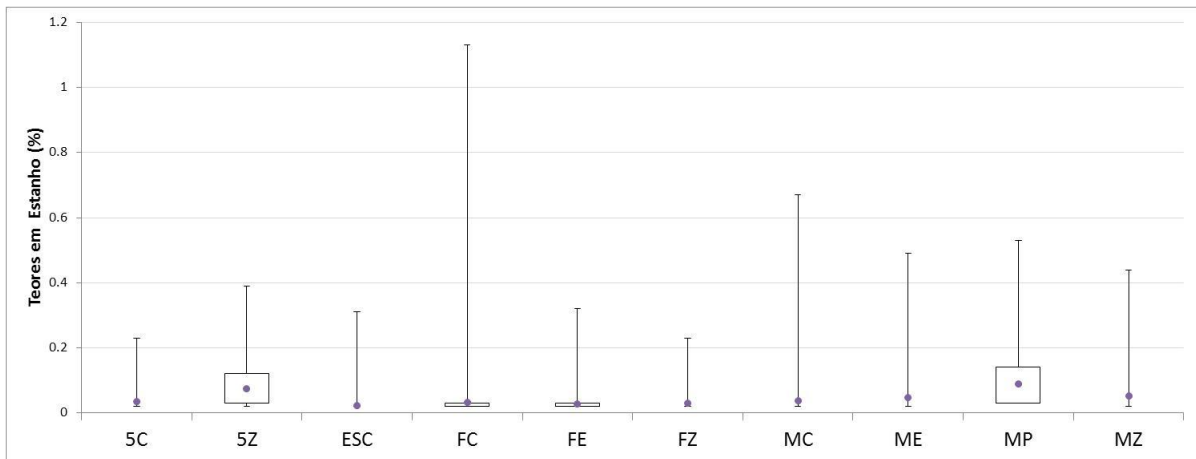


Figura 4.4 *Box-plots* do estanho para os 10 tipos de minério presentes no depósito do Zambujal.

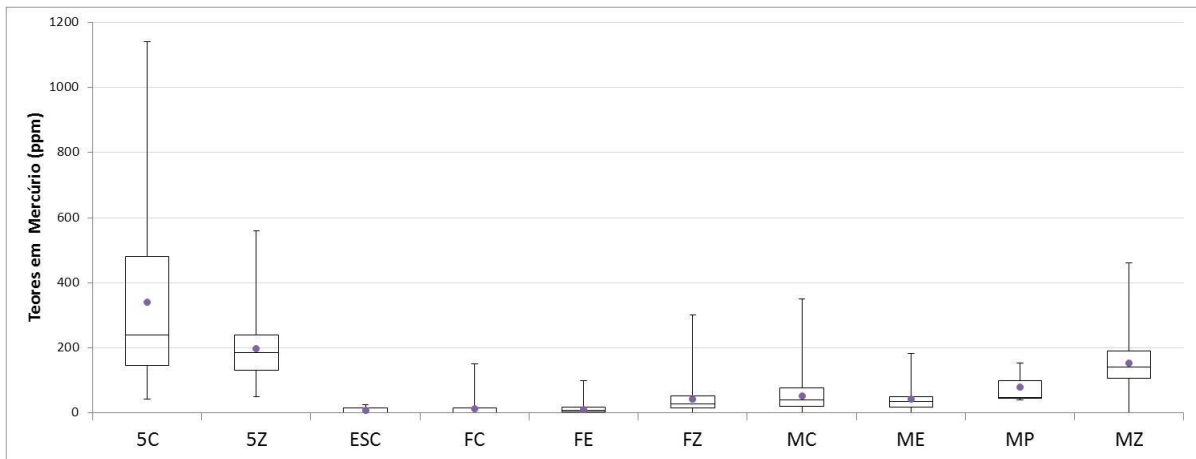


Figura 4.5 *Box-plots* do mercúrio para os 10 tipos de minério presentes no depósito do Zambujal.

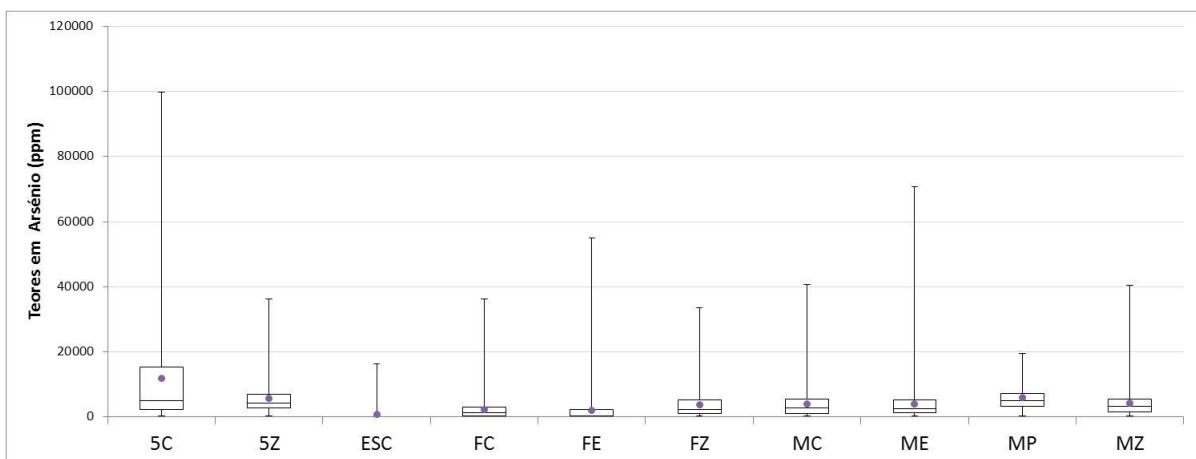


Figura 4.6 *Box-plots* do arsénio para os 10 tipos de minério presentes no depósito do Zambujal.

A tabela 4.1, que se refere a todo o conjunto de dados, mostra que os teores mais abundantes são o enxofre e o ferro, obviamente sempre presentes nos sulfuretos de ferro, com quase 60% do total. Os restantes metais cobre, chumbo, zinco e estanho têm percentagens muito mais baixas e os valores médios rondam 1% para o cobre e zinco, a que se segue o chumbo com 0,3% e o estanho com 0,04%. Pontualmente o cobre atinge valores extremamente elevados, mais de 30%. A dispersão, que é comparada entre variáveis distintas pelo coeficiente de variação, é maior no antimónio, bismuto e selénio. Dos elementos expressos em percentagem, o cobre e o chumbo, têm dispersão muito alta acima de 2; a dispersão do zinco é ainda alta mas menor e a do estanho é muito mais baixa. No que respeita à assimetria esta é, regra geral, positiva com a excepção dos dois elementos mais abundantes, o enxofre e o ferro, o primeiro francamente simétrico e o segundo muito ligeiramente assimétrico negativo.

Os *box-plots* do cobre representados na figura 4.1 mostram que este metal está obviamente mais associado aos tipos de minério cuprífero 5C, FC e MC, especialmente o primeiro, maciço de minério rico em cobre e zinco (MCZ). A mediana, com 7,61%, é superior ao terceiro quartil dos restantes tipos de minérios representativos do cobre (FC e MC). Para os restantes tipos de minério, os teores de cobre são muito mais baixos. Nos que são visíveis verifica-se assimetria positiva, com particular evidência no 5C.

A figura 4.2 corresponde aos *box-plot* para o zinco, onde se observa que os teores mais elevados são persistentes nos minérios zincíferos, por ordem decrescente de teores, minério 5C, 5Z (este designado como um maciço de zinco e chumbo), MZ e FZ. A distribuição dos valores é também assimétrica positiva.

Relativamente ao chumbo representado na figura 4.3, observa-se que este elemento é mais característico dos minérios 5Z e MP. Em ambos verificam-se valores semelhantes para a mediana e quartis, contudo o máximo é observado em MP. Nos restantes tipos de minério os valores são muito baixos.

O estanho tem regra geral teores muito baixos (ver *box-plots* da figura 4.4) e não há nenhum tipo de minério que se distinga para valores mais elevados. No que se observa a assimetria é sempre positiva tal como a tendência dos elementos metálicos já descritos.

O mercúrio (*box-plots* da figura 4.5) e o arsénio (*box-plots* da figura 4.6) têm interesse por serem penalizantes para os metais explorados. O mercúrio ocorre um pouco por todos os tipos de minério mas é mais elevado nos tipos 5C, 5Z, FZ e maciços (MC, ME, MP e MZ). O arsénio também ocorre um pouco por todos os tipos de minério. Em ambas as variáveis e para

todos os tipos de minério a assimetria é sempre positiva. Na rocha encaixante ESC os teores são residuais.

Em síntese, para os metais mais interessantes deste depósito, cobre e zinco, observam-se respectivamente teores máximos de 33,36% e 23,04%, a que correspondem teores médios interessantes nos tipos de minério com maior potencial.

#### 4.1.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA BIVARIADA

Na análise estatística bivariada foi utilizado o coeficiente de correlação de Pearson ( $\rho$ ), que quantifica a correlação entre pares de variáveis. Os valores limite são  $\rho = 1$  se existe correlação positiva e  $\rho = -1$  se a correlação é negativa; se  $\rho=0$  as variáveis não estão correlacionadas. Os resultados para as variáveis disponíveis podem ser observados na tabela 4.2

Tabela 4.2 – Análise estatística bivariada (coeficiente de Pearson).

	Cu	Pb	Zn	S	Fe	Ag	Hg	Sn	As	Sb	Bi	Au	Se	In
Cu	1	-0,02	0,41	0,12	0,07	0,25	<b>0,52</b>	-0,01	0,49	0,47	<b>0,53</b>	0,00	0,48	0,42
Pb		1	0,49	0,37	0,30	0,35	0,27	0,32	0,22	0,08	0,01	0,20	0,21	-0,07
Zn			1	0,38	0,26	0,29	<b>0,91</b>	0,28	0,46	0,28	0,19	0,16	0,34	0,02
S				1	<b>0,89</b>	0,34	0,39	0,29	0,30	0,12	0,08	0,32	0,31	-0,17
Fe					1	0,23	0,10	0,26	0,23	0,06	0,08	0,17	0,24	-0,2
Ag						1	0,35	0,21	0,25	0,41	0,18	0,45	0,09	0,10
Hg							1	0,17	<b>0,66</b>	0,38	0,26	0,03	0,40	-0,09
Sn								1	0,22	0,06	0,00	0,07	0,02	0,04
As									1	0,24	0,26	0,26	0,24	0,13
Sb										1	0,22	0,46	0,24	0,26
Bi											1	0,22	0,34	0,23
Au												1	-0,04	-0,04
Se													1	0,11
In														1

As correlações mais elevadas, superiores a 0,8, ocorrem para os pares Zn/Hg e Fe/S. Outras correlações dignas de registo (superiores a 0,5) podem ser encontradas para os pares: Cu/Hg; Cu/Bi; e Hg/As. Não há correlações negativas com significado.

## 4.2 MODELO DETERMINISTA DOS TIPOS DE MINÉRIO

O depósito mineral do Zambujal ocupa uma área em planta com, cerca de, 600 m por 610 m e encontra-se entre os 520 e os 880 m de profundidade (360 m de espessura máxima).

Para a construção do modelo geométrico vectorial do depósito, o primeiro passo foi escolher vários perfis paralelos, concordantes com a direcção das sondagens e que delimitem todo o volume. Sendo possível identificar uma direcção preferencial para as sondagens, sensivelmente SW-NE, optou-se pela realização de 12 perfis aproximadamente paralelos com esta orientação (numerados de 1 a 12 de SE para NW). Os perfis encontram-se distanciados na ordem dos 30 m, a que corresponde uma área de influência de 15 m para cada lado. Na figura 4.7 mostra-se a representação 2D do perfil 4 com a projecção das sondagens que se encontram na respectiva área de influência.

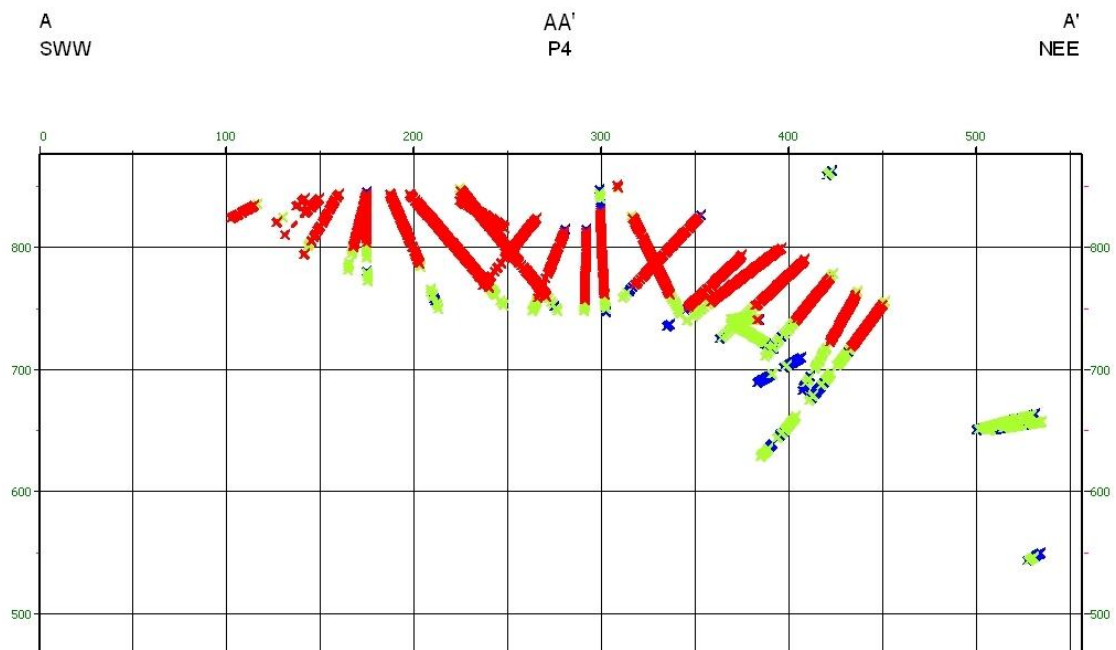


Figura 4.7 Representação 2D do perfil nº 4 com as sondagens da área de influência (a vermelho, troços de sondagem em maciço; a verde troços de sondagem em fissural e a azul ESC).

O passo seguinte consistiu na digitalização dos limites dos tipos de minério agregados em predominantemente maciço (região I - tipos de minério predominantes MC, ME, MZ, 5C e

5Z) e predominantemente fissural (região II – tipos de minério predominantes FC, FE, FZ e ESC, dado que a rocha encaixante está mais associada a ocorrências na base). Por perfil, a digitalização de cada massa foi feita de forma simplificada, de forma a ter-se apenas um contorno de poligonal por região. Assim, por exemplo, as ocorrências de tipo fissural na região I não foram tidas em conta assim como as ocorrências de maciço na região II. Nalguns perfis também só foi digitalizada uma poligonal dado que se considerou que apenas ocorria minério de uma região I ou II.

Para melhor interpretar as regiões perfil a perfil, fez-se inicialmente o desenho manual dos perfis em papel e só posteriormente se passou para o suporte digital. A digitalização foi sempre segmentada em quatro marcadores principais: o topo e a base de cada região ou tipo de minério predominante, sendo a base da região I (maciço) coincide com o topo da região II (fissural). As figuras 4.8 a 4.10 mostram o resultado da digitalização nos perfis 4, 5 e 6. Os restantes perfis encontram-se no anexo III. A figura 4.11 mostra o conjunto dos 12 perfis interpretados e os limites digitalizados das regiões I e II.

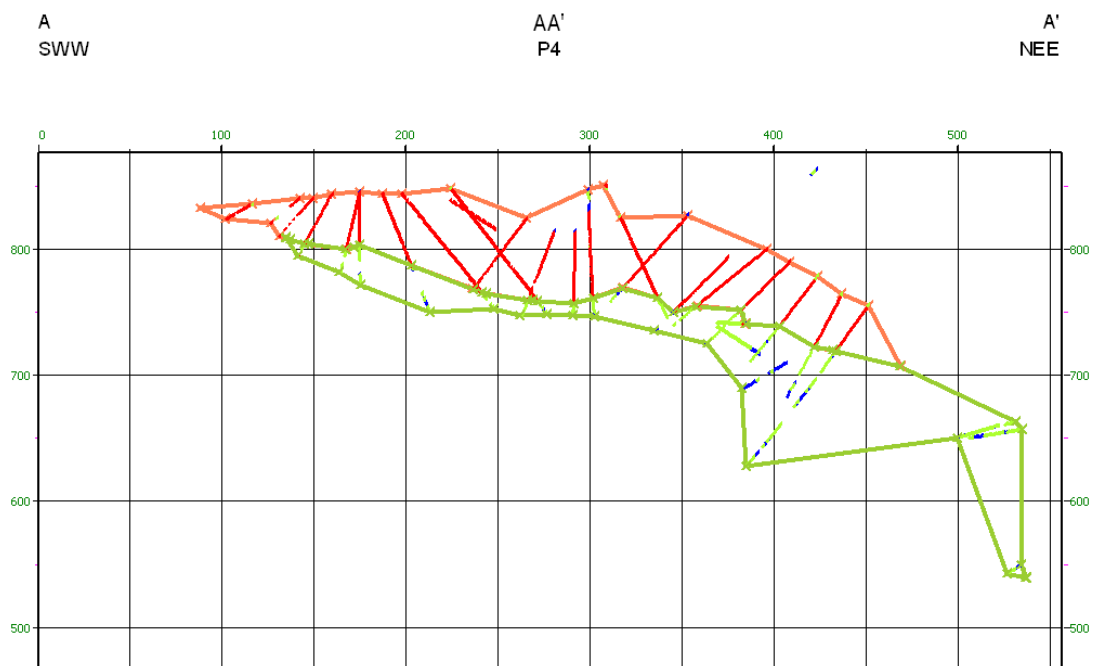


Figura 4.8 Representação 2D do perfil nº 4 com as sondagem da área de influência (a vermelho, troços de sondagem em maciço; a verde troços de sondagem em fissural e a azul ESC) e limites das regiões I e II.

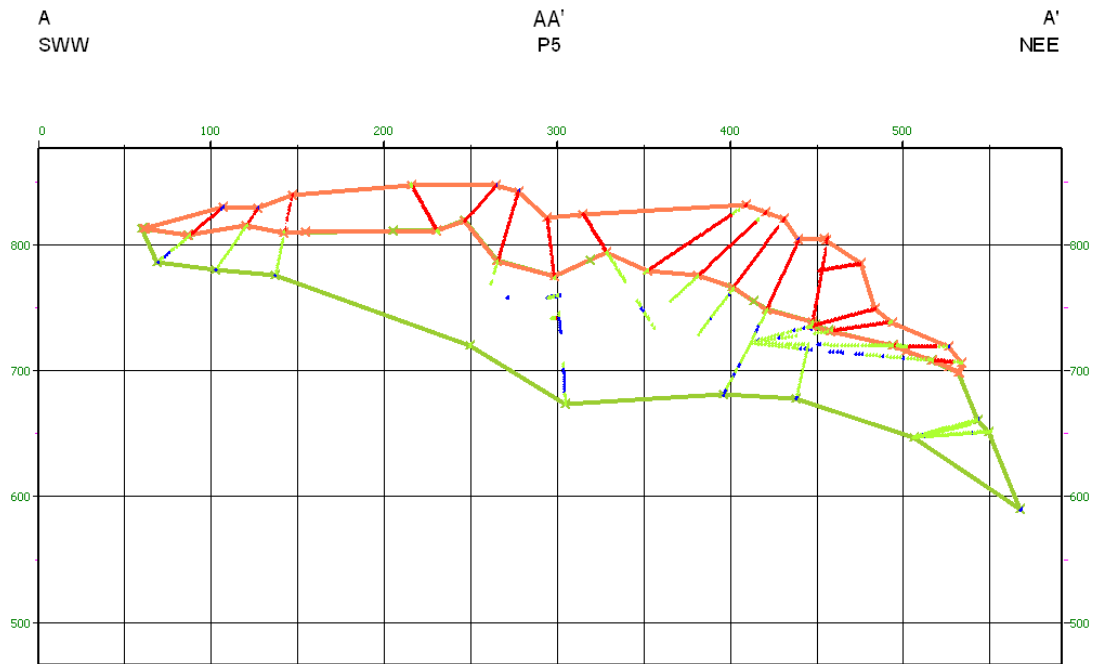


Figura 4.9 Representação 2D do perfil nº 5 com as sondagem da área de influência (a vermelho, troços de sondagem em maciço; a verde troços de sondagem em fissural e a azul ESC) e limites das regiões I e II.

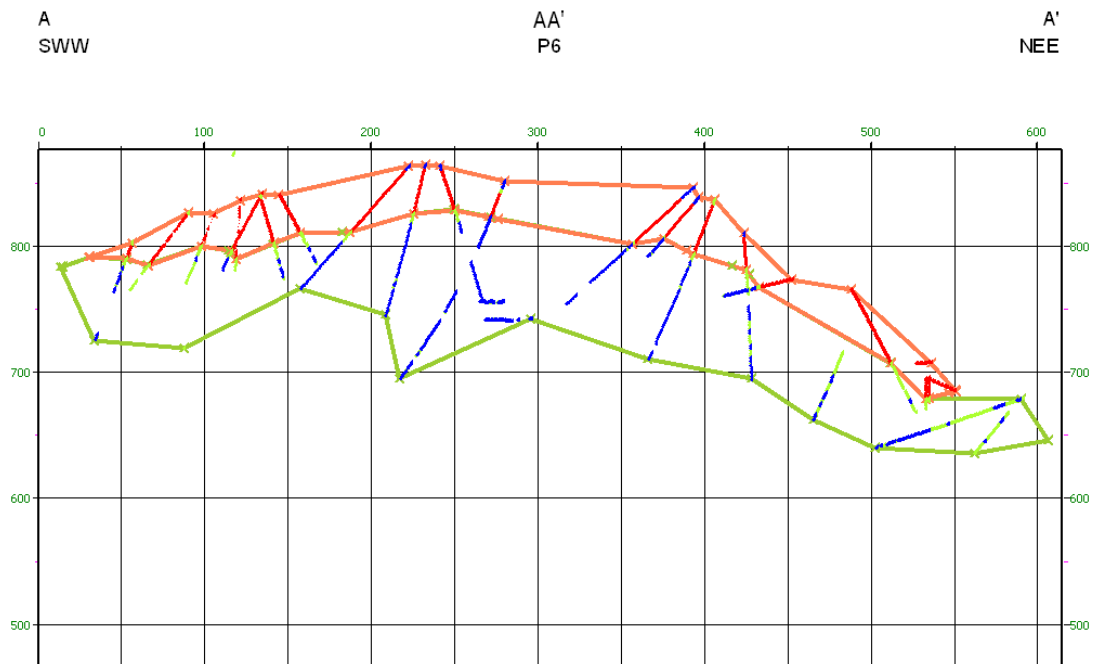


Figura 4.10 Representação 2D do perfil nº 6 com as sondagem da área de influência (a vermelho, troços de sondagem em maciço; a verde troços de sondagem em fissural e a azul ESC) e limites das regiões I e II.

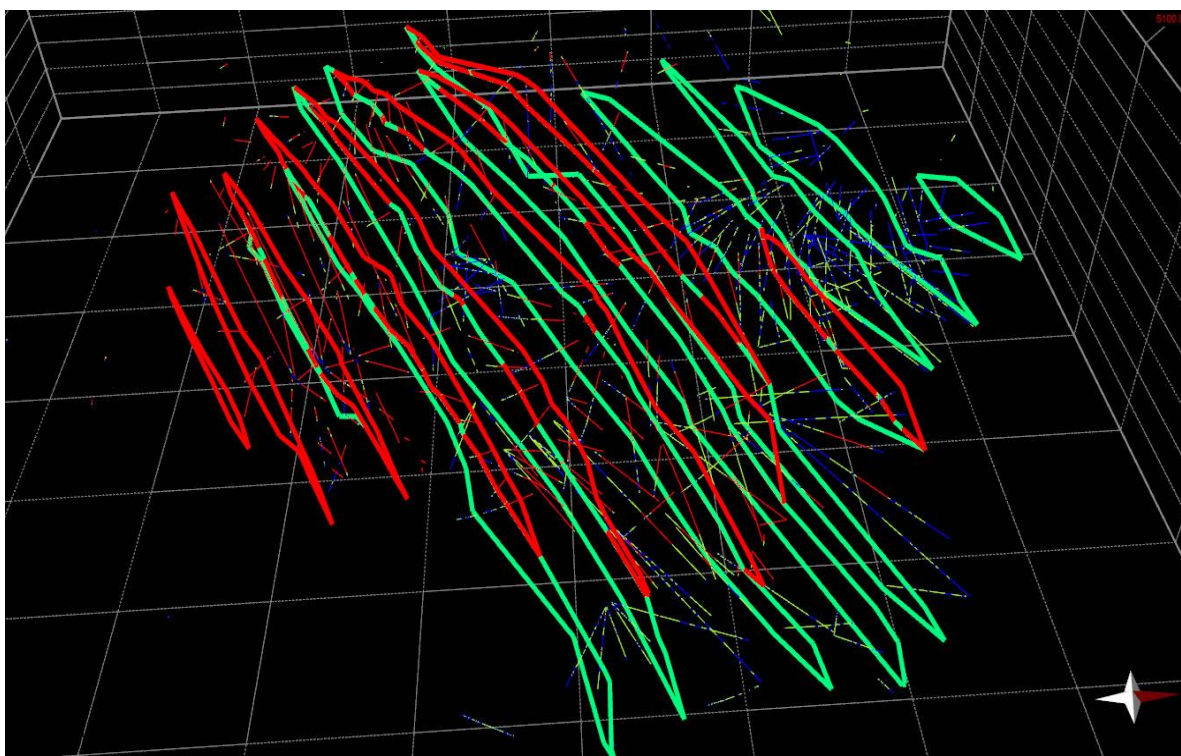


Figura 4.11 Conjunto dos 12 perfis digitalizados (a vermelho região I predominantemente maciço, a verde região II predominantemente fissural).

A geração 3D dos corpos geológicos correspondentes às duas regiões realizou-se por interpolação linear dos marcadores digitalizados previamente. A topologia de cada corpo geológico é constituída por duas superfícies, uma para o topo e outra para a base. Os corpos geológicos estão justapostos de forma a não existir volume entre eles. O *software* Move® faz a interpolação das superfícies a partir de pontos igualmente espaçados retirados das linhas poligonais que foram digitalizadas. Cada superfície é representada como uma malha de triângulos.

A figura 4.12 representa o resultado obtido para a modelação 3D dos corpos geológicos correspondentes às regiões I e II. No geral, pode-se observar que a massa mineral do Zambujal apresenta uma estrutura em concha, com ocorrências do minério maciço (região I) no topo do minério fissural (região II). O minério maciço tem maior expressão na zona SE, enquanto que o fissural tem um prolongamento para NW, que não é acompanhado pelo primeiro.

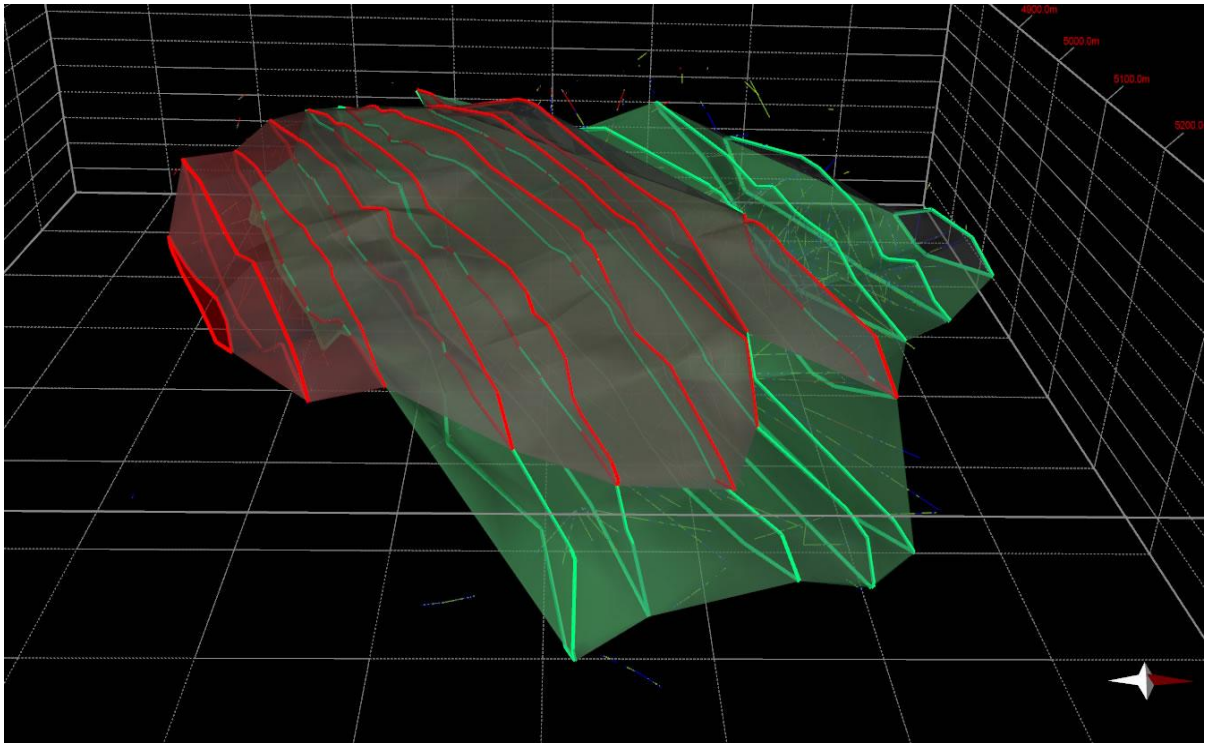


Figura 4.12 Representação das superfícies interpoladas dos corpos geológicos correspondentes aos minérios do tipo maciço (região I, a vermelho) e do tipo fissural (região II, a verde) e sobreposição com os contornos nos 12 perfis.

Ainda no contexto desta etapa gerou-se um modelo de blocos adequado aos limites dos dois corpos geológicos. Tendo em atenção a malha de amostragem nas sondagens e o número total de blocos que são gerados (tabela 4.3), optou-se por gerar uma malha com blocos unitários de 5 por 5 por 5 m ( $125 \text{ m}^3$  de volume). Seguidamente converteu-se a representação vectorial numa representação matricial através das funções do *software* MOVE®. Dado que as superfícies do topo e da base coincidem, não foram encontradas ambiguidades (blocos pertencentes simultaneamente a duas regiões) na transformação. A figura 4.13 mostra o resultado da morfologia dos corpos geológicos na forma de representação matricial.

Tabela 4.3 – Características geométricas da malha de blocos

Direcção	Coordenadas centro do bloco (m)		N.º de blocos	Espaçamento (m)
	Canto interior esquerdo	Canto superior direito		
<b>OX</b>	4872,5	5467,5	120	5
<b>OY</b>	1612,5	2217,5	122	5
<b>OZ</b>	522,2	877,2	72	5

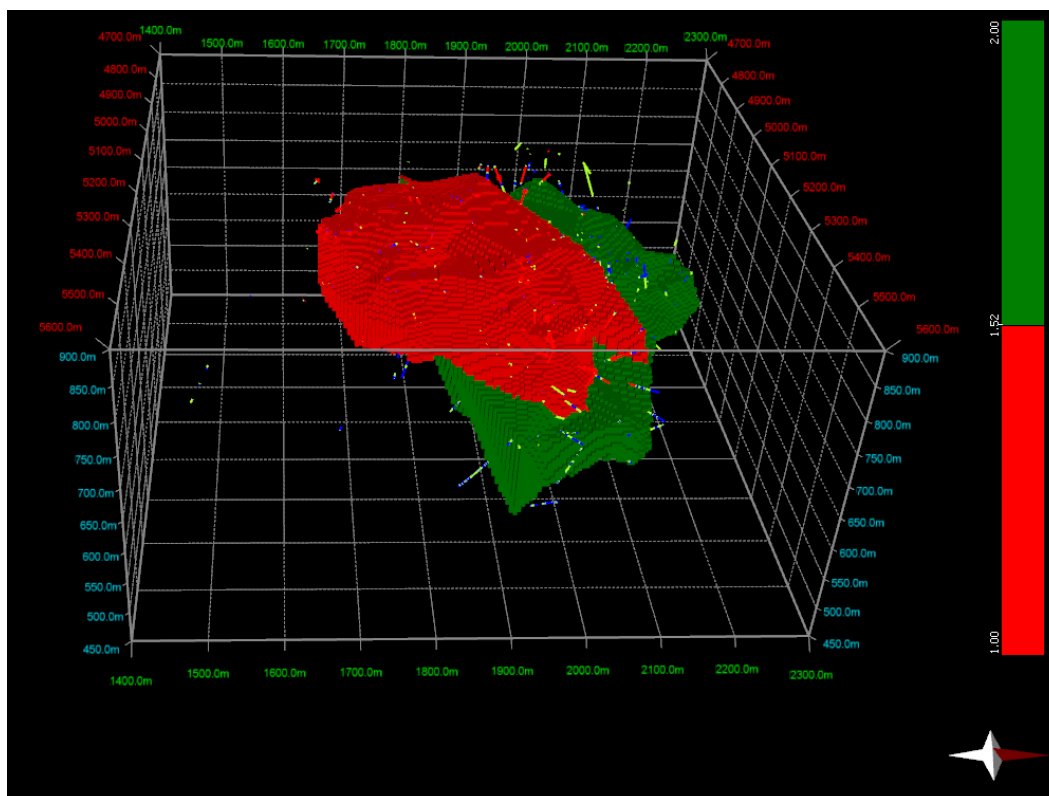


Figura 4.13 Representação da morfologia dos corpos geológicos sobre o modelo de blocos, com a região I (maciço) a vermelho e a região II (fissural) a verde, e sobreposição das sondagens.

Para terminar, fez-se o cruzamento dos troços de sondagem discretizados por tipo de minério com o modelo de blocos tendo-se calculado a proporção ou probabilidade *a priori* de cada tipo de minério em cada região I ou II. Os resultados são apresentados na tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Probabilidades *a priori* para os vários tipos de minério por região do modelo.

	<b>Tipo de mineralização</b>	<b>Código</b>	<b>Probabilidade <i>a priori</i></b>
<b>Região I (predominantemente maciço)</b>	Encaixante	ESC	0,038
	Fissural	F	0,089
	Maciço	M	0,873
<b>Região II (predominantemente fissural)</b>	Encaixante	ESC	0,464
	Fissural	F	0,489
	Maciço	M	0,047

Estes dados mostram, em primeiro lugar, a tendência que resulta da digitalização, isto é, na região I ocorrem maioritariamente minérios de tipo maciço (87,3%) e na região II minérios do tipo fissural (48,9%). As ocorrências que são resultantes de má classificação na digitalização

são em todos os casos muito baixas, na região I as ocorrências de fissural são de 8,9% e de maciço na região II que é 4,7%. A questão mais importante está relacionada com a rocha encaixante (ESC) que ocorre na região II repartida em proporções semelhantes com o minério fissural. Destaca-se que na digitalização assumiu-se que o ESC deveria pertencer principalmente a minério fissural muito pobre em metais pelo que os resultados são totalmente coerentes. Finalmente refira-se que as probabilidades de ocorrência de F e ESC na região II são repartidas com proporções muito semelhantes, o que significa que em cerca de metade do volume nesta região os blocos contêm minério fissural com interesse económico.

### 4.3 MODELO ESTOCÁSTICO DOS TIPOS DE MINÉRIO

O modelo morfológico das duas regiões é condicionado pela interpretação geológica heurística da fronteira que separa as observações de minério maciço do minério fissural. Trata-se por isso de um modelo muito simplificado, quer do ponto de vista da geometria quer do ponto de vista dos tipos de mineralizações. Por exemplo, as ocorrências contraditórias (fissural na região I e maciço na região II) não foram tidas em conta; e também as ocorrências de rocha encaixante (ESC) foram predominantemente contabilizadas na região II.

Nesta etapa pretende-se construir um modelo estocástico dos tipos de minério (F-fissural, M-maciço e ESC-rocha encaixante) condicionado pelas probabilidades *a priori* que resultam do modelo morfológico simplificado das regiões e pela informação das sondagens. Para tal, recorreu-se à variografia e simulação do sequencial da indicatriz (SSI).

A análise da continuidade espacial em contexto geoestatístico é, geralmente, realizada pela variografia (Soares, 2006), tornando-se necessário identificar as direcções que possuam continuidade satisfatória. Em casos de estudo 3D esta pesquisa pode ser morosa, mas neste caso estudo relaciona-se com a disposição dos perfis e das sondagens, pelo que foi adoptada a estratégia habitual de tentativa e erro para encontrar as combinações de azimutes e inclinações mais favoráveis ao estudo. Assim, pesquisaram-se cinco direcções:

- a. (45°, -70°) – Direcção e inclinação de cerca de 75% das sondagens (direcção NE/SW);
- b. (45°, 70°) – Direcção e inclinação das restantes sondagens (direcção NE/SW);
- c. (0°, 90°) – Direcção vertical (direcção N/S), cruza sondagens diferentes;
- d. (55°, 0°) – Direcção no plano horizontal (direcção NE/SW), com direcção e inclinação correspondente aos perfis previamente seleccionados.

- e.  $(-35^\circ, 0^\circ)$  – Outra direcção no plano horizontal (direcção NW/SE), perpendicular aos perfis.

Após a obtenção dos variogramas experimentais foi necessário o seu ajuste através de uma função teórica. Este estudo de variografia foi realizado primeiramente para as cinco direcções já referidas. Dado que se observou semelhança nas amplitudes das estruturas dos modelos ajustados, optou-se pela análise dos variogramas nas direcções vertical e omnidireccional horizontal. As figuras 4.14 a 4.16 apresentam os variogramas ajustados para a rocha encaixante (ESC), e mineralizações do tipo fissural (F) e maciço (M) nas direcções em estudo.

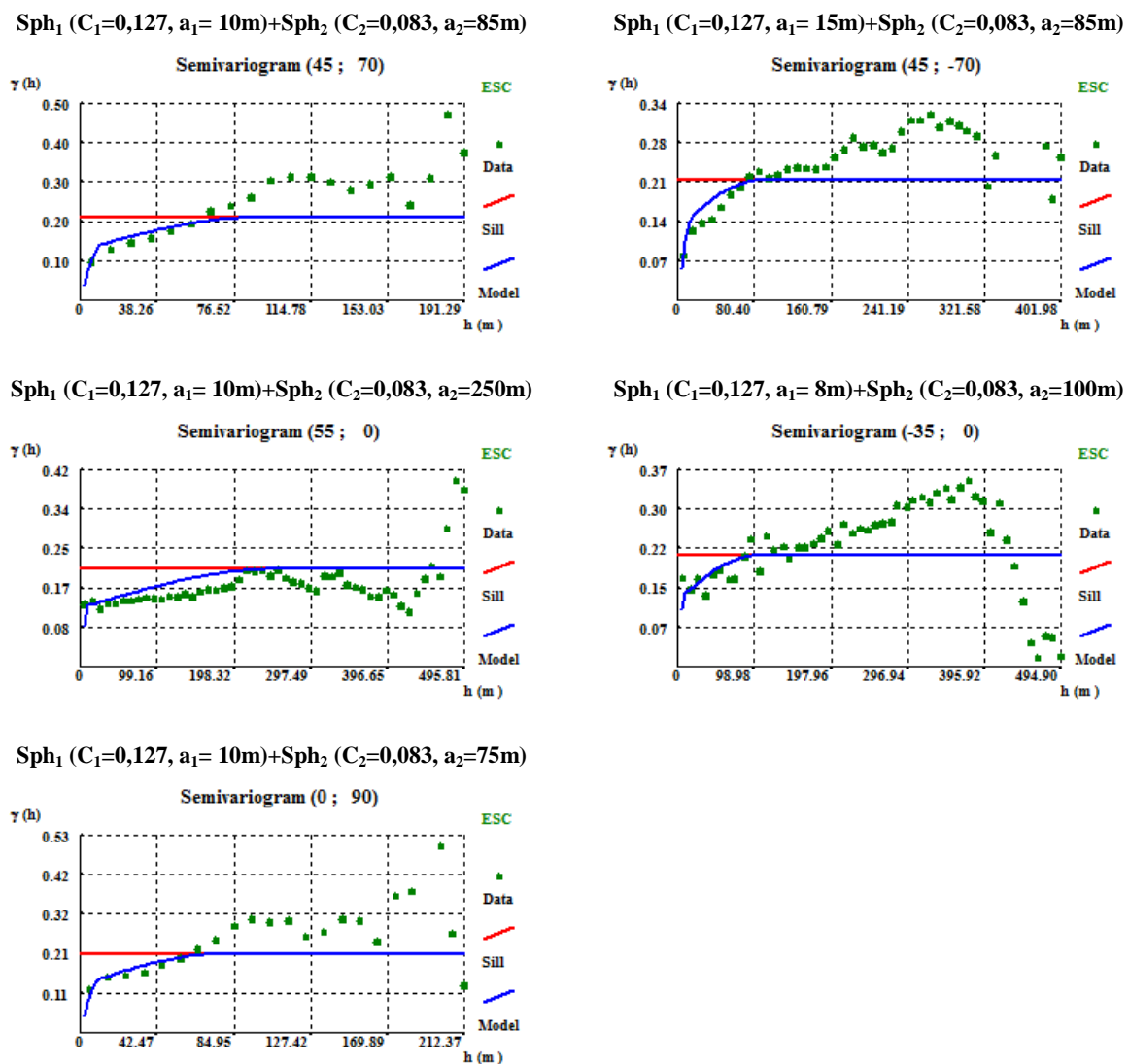


Figura 4.14 Variogramas experimentais ajustados ao modelo esférico, com duas estruturas, para a rocha encaixante (ESC).

Como já foi referido, nesta análise pode-se observar uniformidade entre o ajuste dos modelos teóricos para os códigos ESC e F, sendo comum o ajuste ao modelo esférico com duas estruturas. A amplitude da primeira estrutura é baixa (cerca de 10 m), enquanto que para a segunda estrutura a amplitude assume valores significativamente elevados, entre os 60 e 250 m.

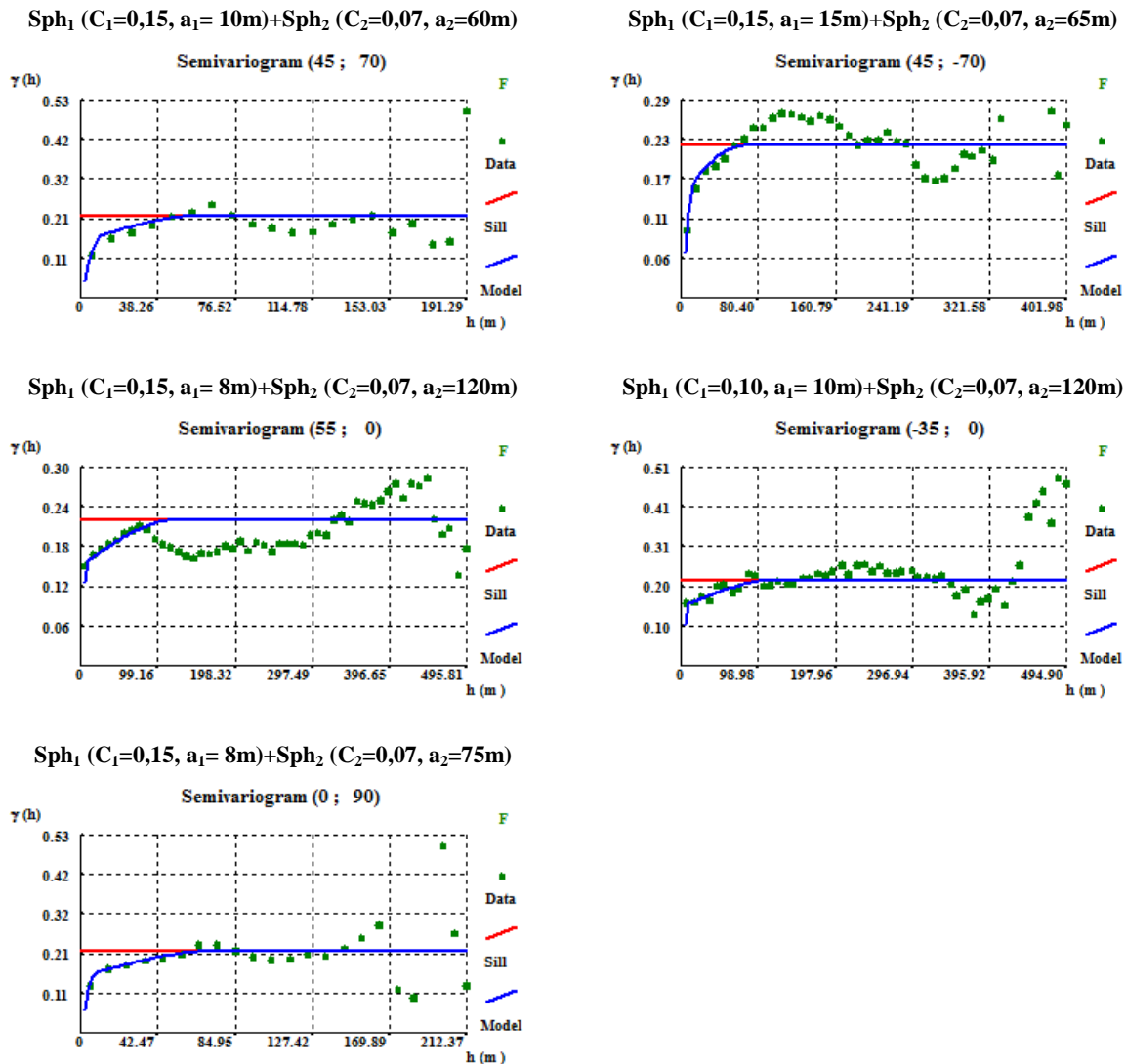


Figura 4.15 Variogramas experimentais ajustados ao modelo esférico, com duas estruturas, para a mineralização do tipo Fissural.

Para as mineralizações do tipo maciço, a grande diferença é o ajuste ao modelo esférico com apenas uma estrutura. Neste caso, as amplitudes maiores encontram-se na direcção paralela aos perfis.

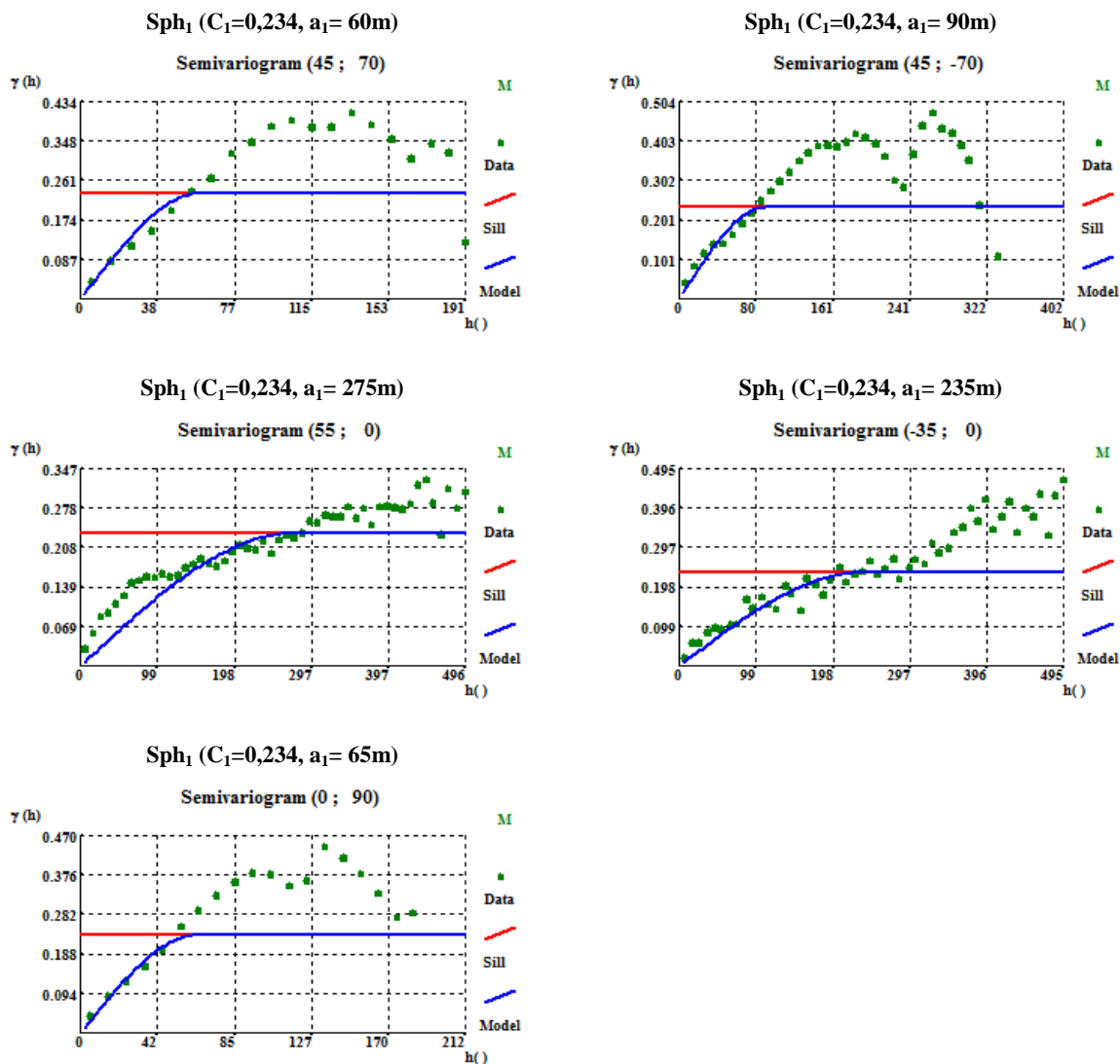


Figura 4.16 Variogramas experimentais ajustados ao modelo esférico, com uma estrutura, para a mineralização do tipo Maciço.

De seguida apresenta-se o conjunto dos variogramas experimentais das direcções vertical e horizontal omnidireccional (figuras 4.17 a 4.19), para a rocha encaixante (ESC), mineralizações do tipo fissural (F) e maciço (M).

Seguidamente realizaram-se 200 cenários simulados dos tipos de minério F, M e ESC por SSI, condicionados localmente às probabilidades *a priori* obtidas anteriormente (tabela 4.4) e aos dados das sondagens. Calcularam-se ainda a média das simulações (de que resulta três matrizes de probabilidade de pertença de cada bloco a um determinado tipo de mineralização ou à rocha encaixante) e a entropia que mede a dispersão local dos resultados. As figuras 4.20 a 4.22 representam os resultados da média de simulações.

$$\text{Sph}_1 (C_1=0,127, a_1= 10\text{m})+\text{Sph}_2 (C_2=0,083, a_2=250\text{m})$$

$$\text{Sph}_1 (C_1=0,127, a_1= 10\text{m})+\text{Sph}_2 (C_2=0,083, a_2=75\text{m})$$

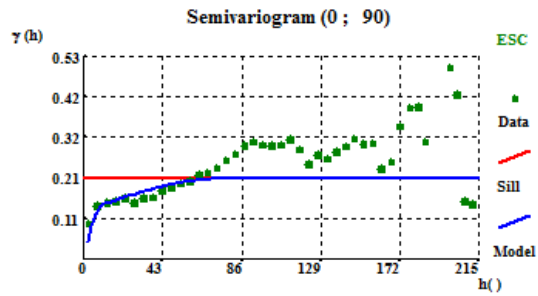
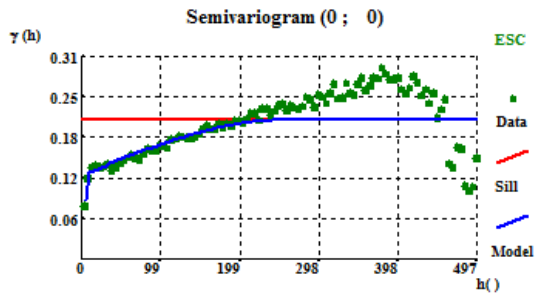


Figura 4.17 Variogramas experimentais nas direcções vertical e omnidireccional horizontal ajustados ao modelo esférico, com duas estruturas, para a rocha encaixante (ESC).

$$\text{Sph}_1 (C_1=0,151, a_1= 10\text{m})+\text{Sph}_2 (C_2=0,069, a_2=150\text{m})$$

$$\text{Sph}_1 (C_1=0,151, a_1= 10\text{m})+\text{Sph}_2 (C_2=0,069, a_2=75\text{m})$$

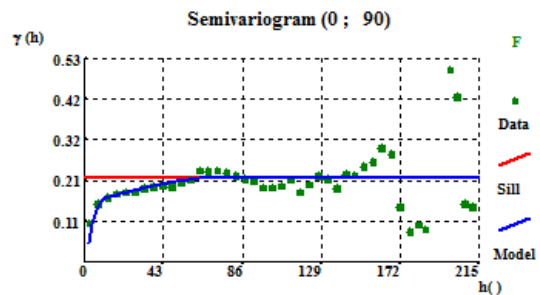
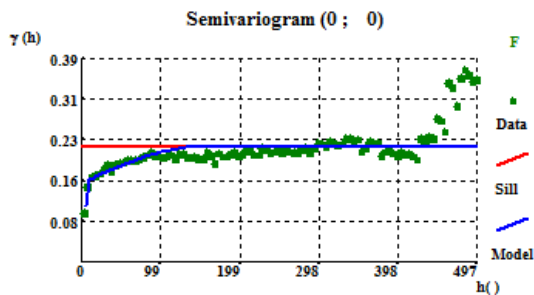


Figura 4.18 Variogramas experimentais nas direcções vertical e omnidireccional horizontal ajustados ao modelo esférico, com duas estruturas, para a mineralização do tipo fissural.

$$\text{Sph}_1 (C_1=0,234, a_1= 200\text{m})$$

$$\text{Sph}_1 (C_1=0,234, a_1= 60\text{m})$$

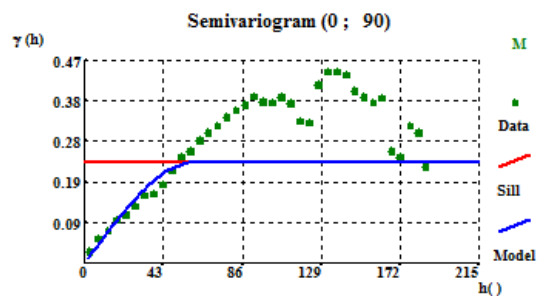
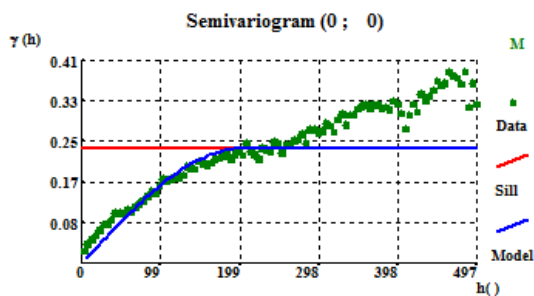


Figura 4.19 Variogramas experimentais nas direcções vertical e omnidireccional horizontal ajustados ao modelo esférico, com uma estrutura, para a mineralização do tipo maciço.

Estas imagens mostram que as probabilidades de ocorrência de rocha encaixante (figura 4.22) são semelhantes à ocorrência de mineralizações do tipo fissural (figura 4.23) e igualmente mais elevadas na região II, porque precisamente tanto os códigos F como o ESC têm probabilidades de ocorrência igualmente repartidas na região II e quase ausência na região I.

Pelo contrário, as probabilidades de cada bloco pertencer a M são bastante elevadas na região I e muito mais baixas na região II. Para confirmar a concordância dos resultados com a tabela 4.4 calcularam-se os valores para as imagens simuladas que se apresentam na tabela 4.5.

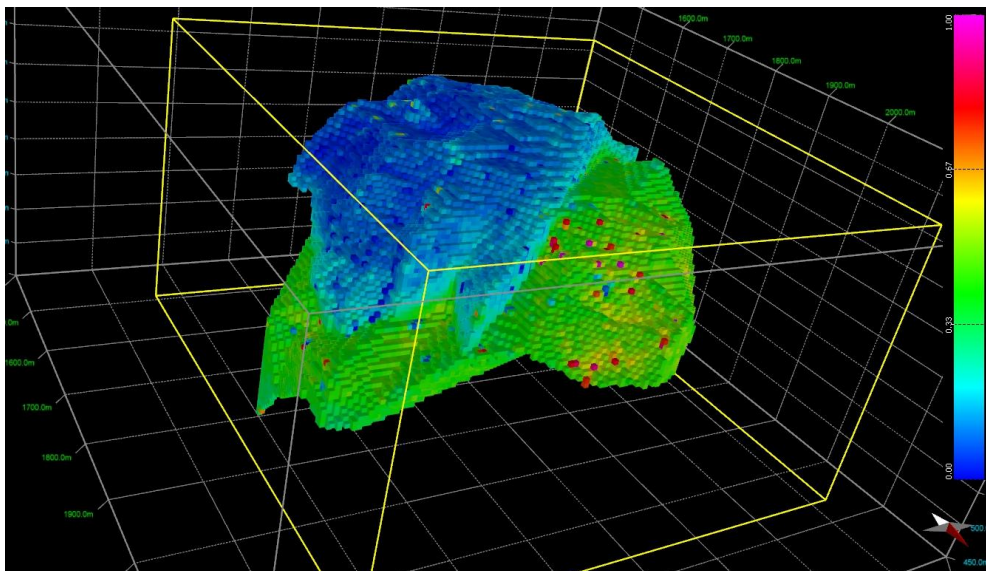


Figura 4.20 Modelo 3D da probabilidade de ocorrência de rocha encaixante (ESC) calculado pela média dos 200 cenários simulados.

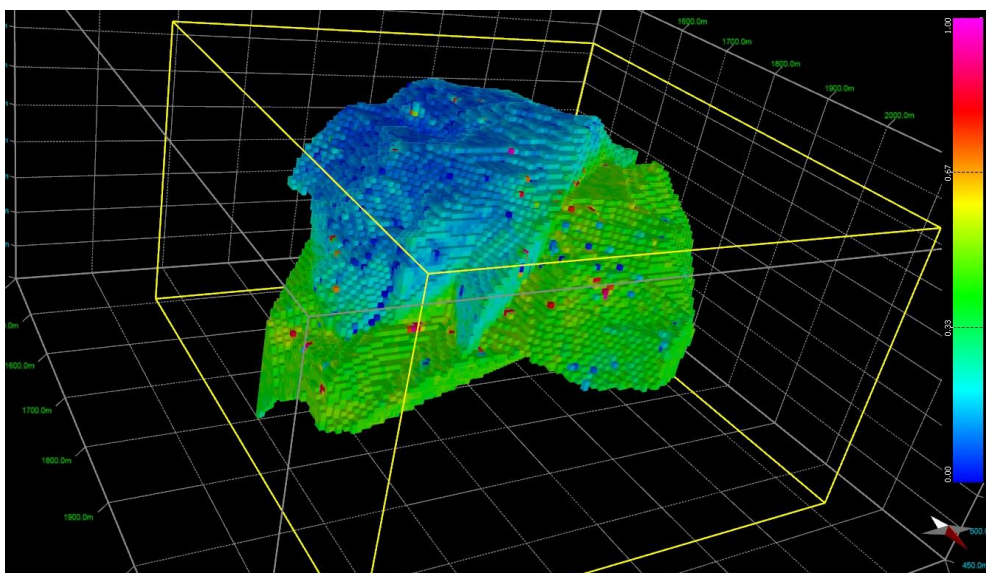


Figura 4.21 Modelo 3D da probabilidade de ocorrência de minério de tipo fissural (F) calculado pela média dos 200 cenários simulados.

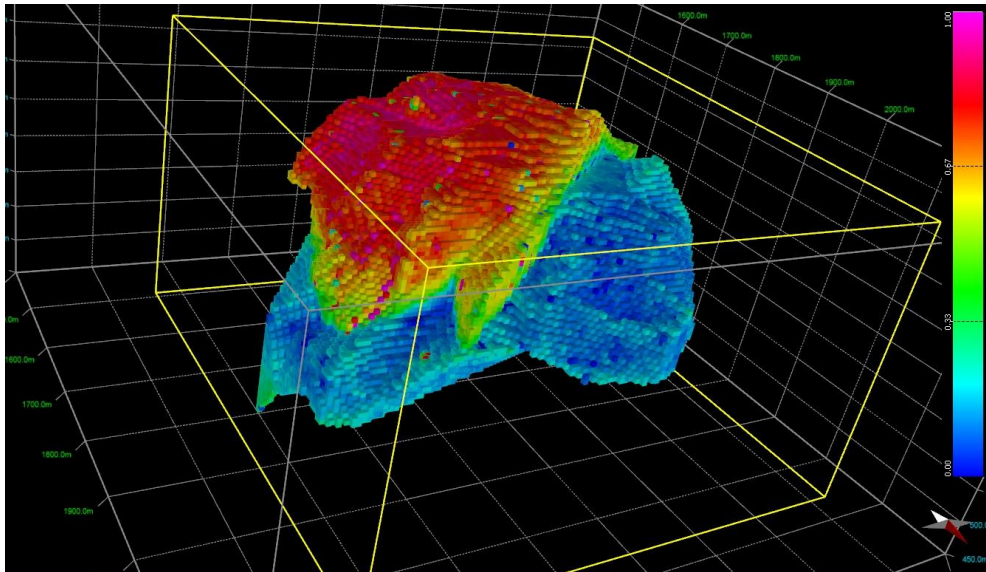


Figura 4.22 Modelo 3D da probabilidade de ocorrência de minério de tipo maciço (M) calculado pela média dos 200 cenários simulados.

Tabela 4.5 – Tabela discriminativa das probabilidades *a priori* construídas com base nos dados experimentais e os calculados como resultado das simulações.

	<b>Tipo de mineralização</b>	<b>Código</b>	<b>Probabilidades <i>a priori</i></b>	<b>Média das simulações</b>
<b>Região I</b>	Encaixante	ESC	0,038	0,071
	Fissural	F	0,089	0,105
	Maciço	M	0,873	0,824
<b>Região II</b>	Encaixante	ESC	0,464	0,458
	Fissural	F	0,489	0,443
	Maciço	M	0,047	0,099

A tabela 4.5 mostra que as simulações são condicionais às probabilidades *a priori*, todavia nas categorias menos abundantes este condicionamento é menor, muito provavelmente devido ao efeito de desagrupamento dos dados experimentais.

Para mostrar os resultados em maior detalhe optou-se por apresentar nas figuras seguintes 4.23 e 4.24 representações de três cenários simulados em dois perfis intermédios assim como as imagens médias correspondentes às probabilidades de pertença às categorias ESC, F e M e a entropia calculada localmente pela variabilidade dos resultados simulados.

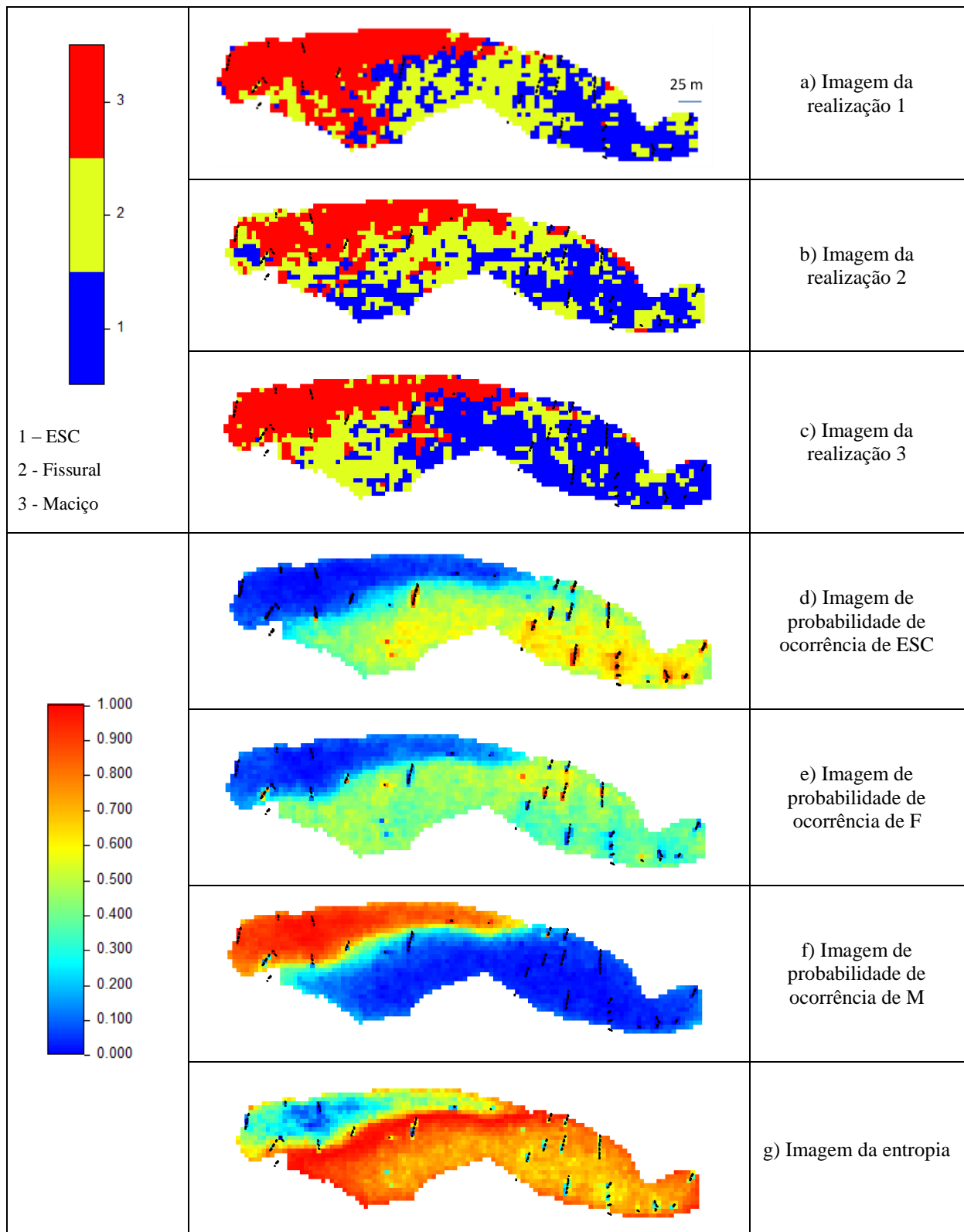


Figura 4.23 Representação sequencial do modelo de mineralizações, em perfil (secção a 61 m), com as respectivas legendas.

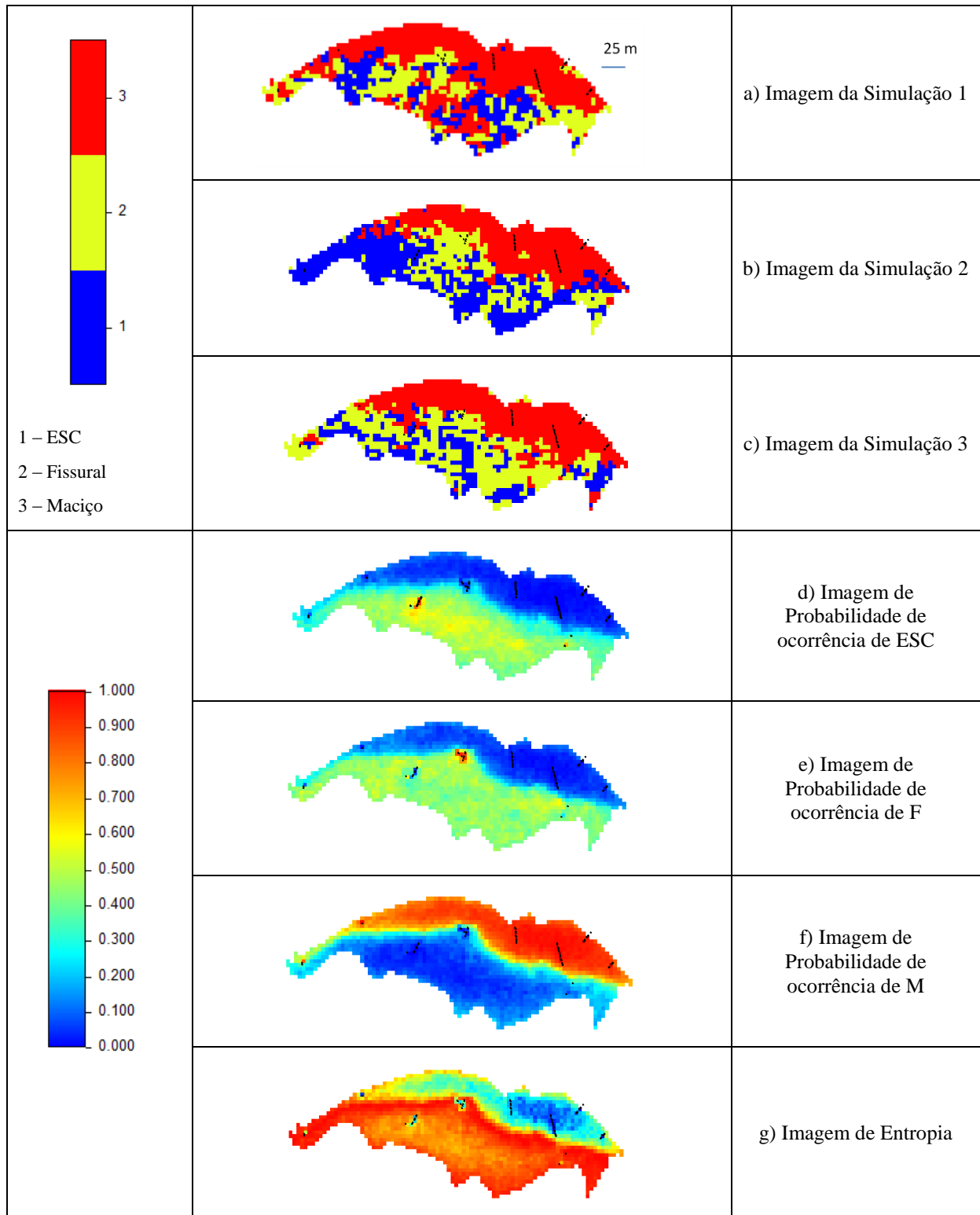


Figura 4.24 Representação sequencial do modelo de mineralizações, em planta (secção a 41 m), com as respectivas legendas.

As imagens simuladas e as imagens médias ou de probabilidade de pertença a cada categoria confirmam as tendências já evidenciadas anteriormente, nomeadamente a prevalência do maciço no topo do depósito e a repartição entre o fissural e a rocha encaixante na base. No que se refere à incerteza mostrada pelo parâmetro entropia, os valores são mais baixos, próximos de zero, no interior da região I e aumentam próximo do limite superior da região I e muito mais na proximidade da região II, onde prevalecem sempre muito elevados no seu interior com excepção na proximidade das sondagens. Este facto mostra que os blocos simulados no limite superior da região I utilizam amostras exteriores provavelmente codificadas como ESC que fazem aumentar a incerteza próximo da fronteira, o que é coerente. Também na região II os valores são sempre altos devido à incerteza entre a repartição dos minérios de tipo F e a rocha encaixante ou fissural pobre. Refira-se ainda que as imagens médias e a de entropia estão bastante atenuadas o que é sinal de que as 200 realizações são suficientes para a modelação.

### **4.4 MODELO DE TEORES EM COBRE E ZINCO**

O modelo de teores obtém-se por novas simulações, neste caso com a SSD, condicionada ao modelo de tipos de minério apresentado no ponto anterior e aos teores medidos nas sondagens. Neste algoritmo de simulação utilizou-se o condicionamento a histogramas locais de acordo com o procedimento teórico já explicado anteriormente.

O estudo para os teores inicia-se com o cálculo dos variogramas. Para o efeito, numa primeira tentativa utilizaram-se as mesmas cinco direcções do cálculo dos variogramas dos tipos de minério. Os variogramas obtidos ou foram inconclusivos, ou então, semelhantes em termos de amplitude. Assim, numa segunda tentativa optou-se por considerar um variograma omnidireccional para cada variável.

De referir, que no cálculo dos variogramas acabaram por ser excluídos os valores anómalos mais elevados, tanto para o cobre como para o zinco, uma vez que a presença destes valores afectava a interpretação dos variogramas, e impossibilitava o ajuste de um modelo (as leis de distribuição dos valores destes elementos é muito assimétrica e de tipo lognormal). Para as duas variáveis consideraram-se limites que excluíssem cerca de 15% dos dados que foram repostos para a simulação. Sem os valores anómalos, foram ajustados modelos de tipo esférico com duas estruturas às duas variáveis (figuras 4.25 e 4.26). Para as duas variáveis, a amplitude da primeira estrutura é relativamente baixa quando comparado com a amplitude da

segunda, sendo a segunda estrutura dos teores de cobre na ordem dos 80 m, e metade no caso do zinco.

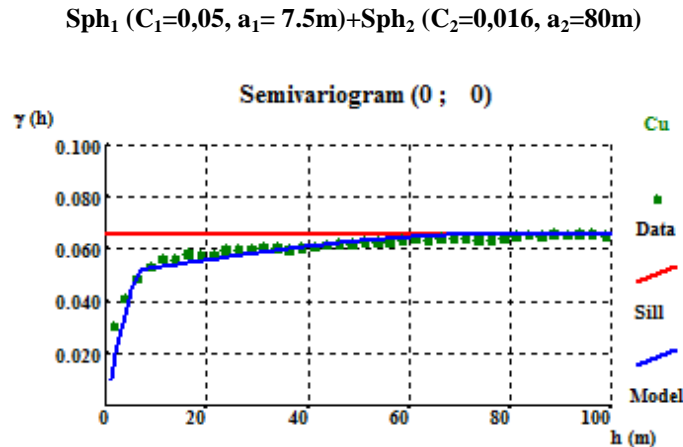


Figura 4.25 Variograma experimental omnidireccional do cobre ajustado a duas estruturas do modelo esférico.

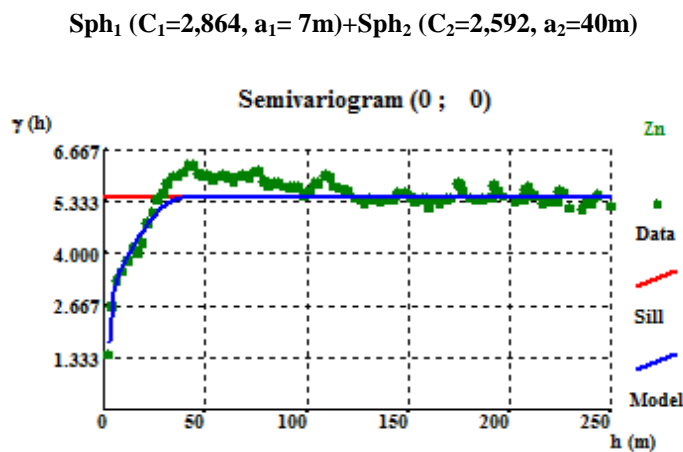


Figura 4.26 Variograma experimental omnidireccional do zinco ajustado a duas estruturas do modelo esférico.

Com os dados da variografia e dos histogramas locais, procedeu-se à SSD de 200 realizações, para que a cada imagem de tipos de minério obtida por SSI tenha uma imagem equivalente de teores (um para um).

A par do sub-capítulo anterior, optou-se por apresentar as várias fases do modelo de teores com uma sequência de imagens para as mesmas secções de perfil e planta, para o cobre (figuras 4.27 e 4.28) e para o zinco (figuras 4.29 e 4.30), onde as três primeiras dizem sempre respeito a três realizações de teores, a quarta é a imagem média de teores e a quinta a imagem da variância.

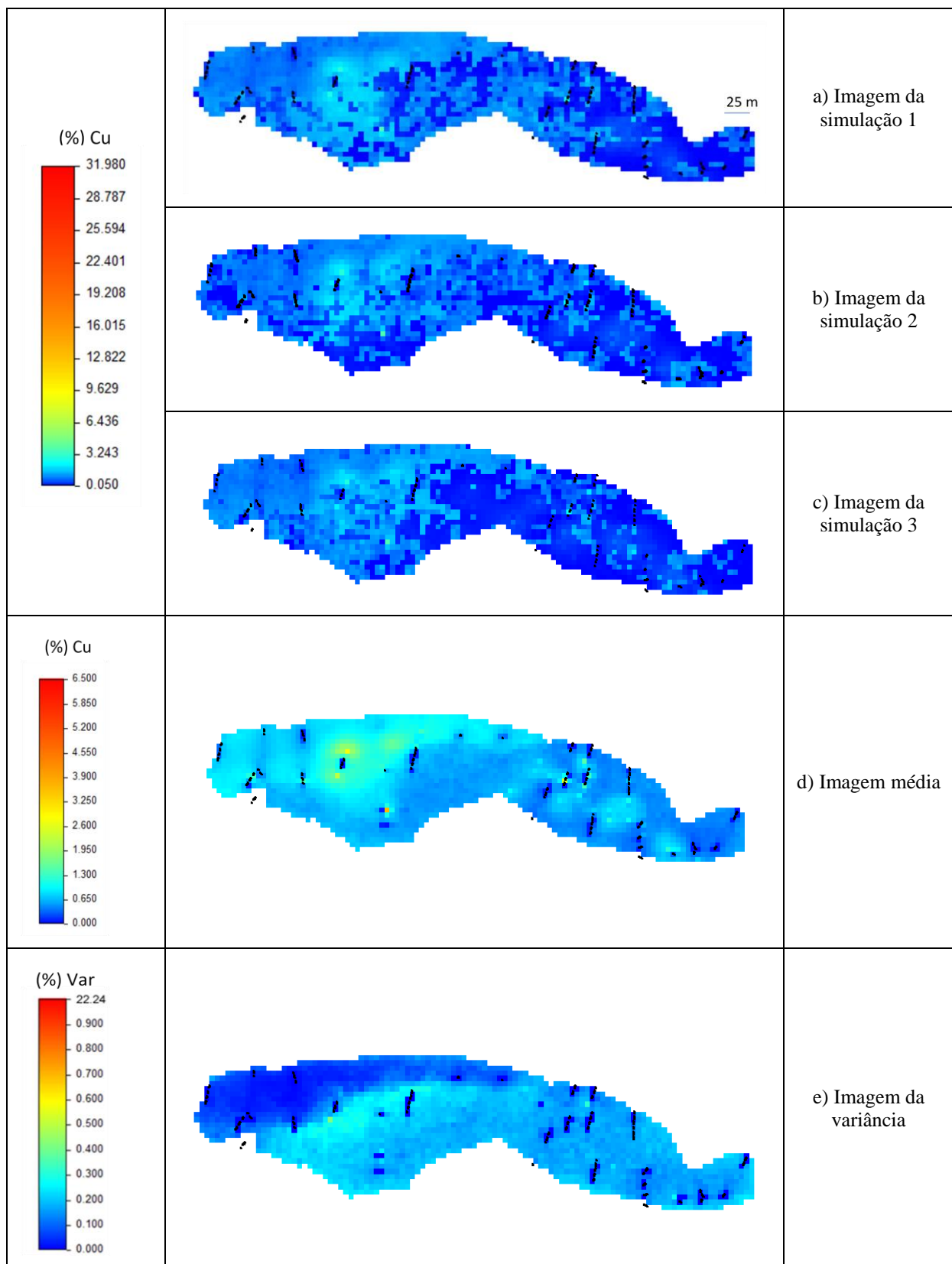


Figura 4.27 Representação em perfil (secção a 61 m), com respectivas legendas, relativamente aos teores de Cu.

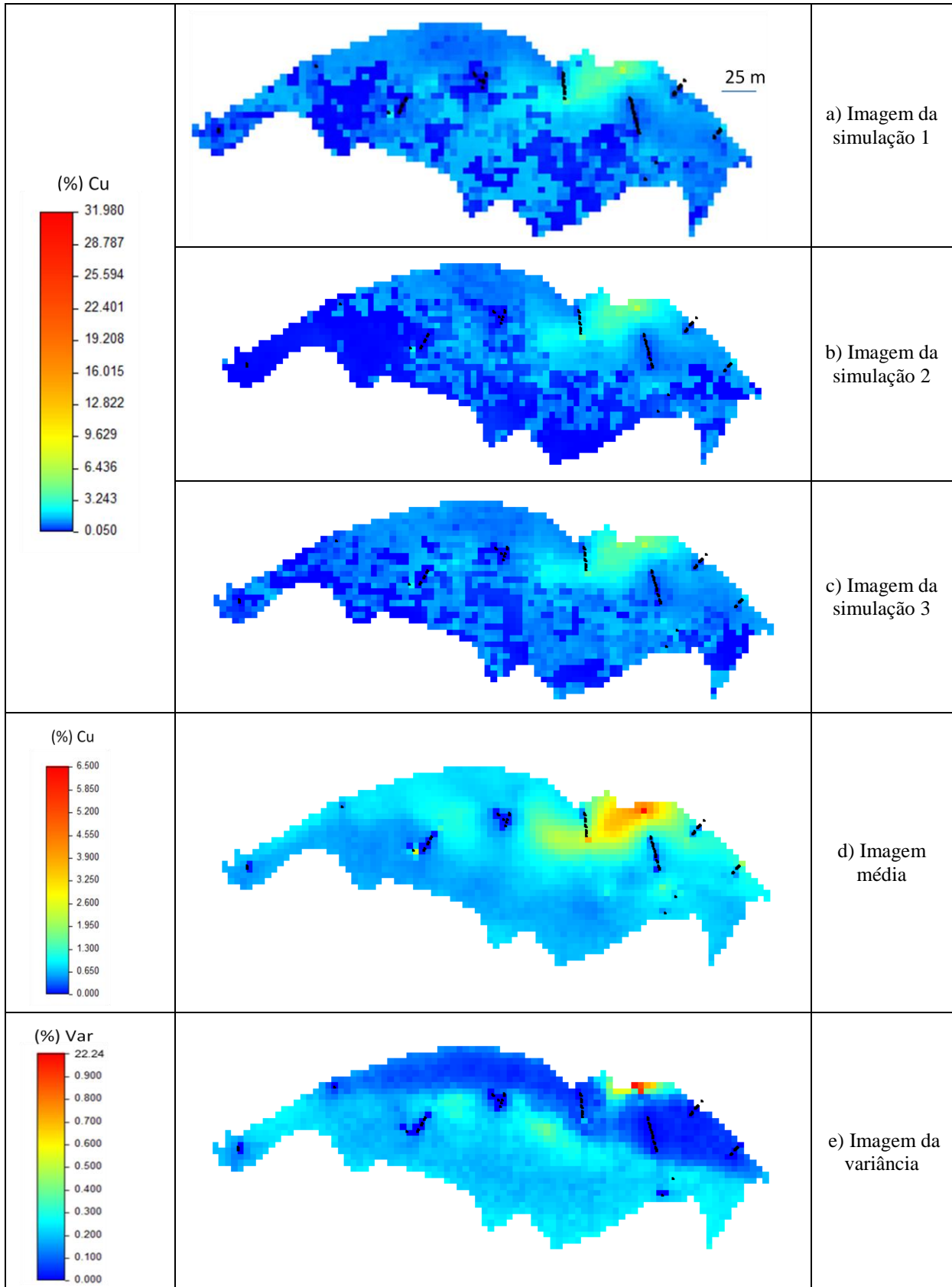


Figura 4.28 Representação em planta (secção a 41 m), com respectivas legendas, relativamente aos teores de Cu.

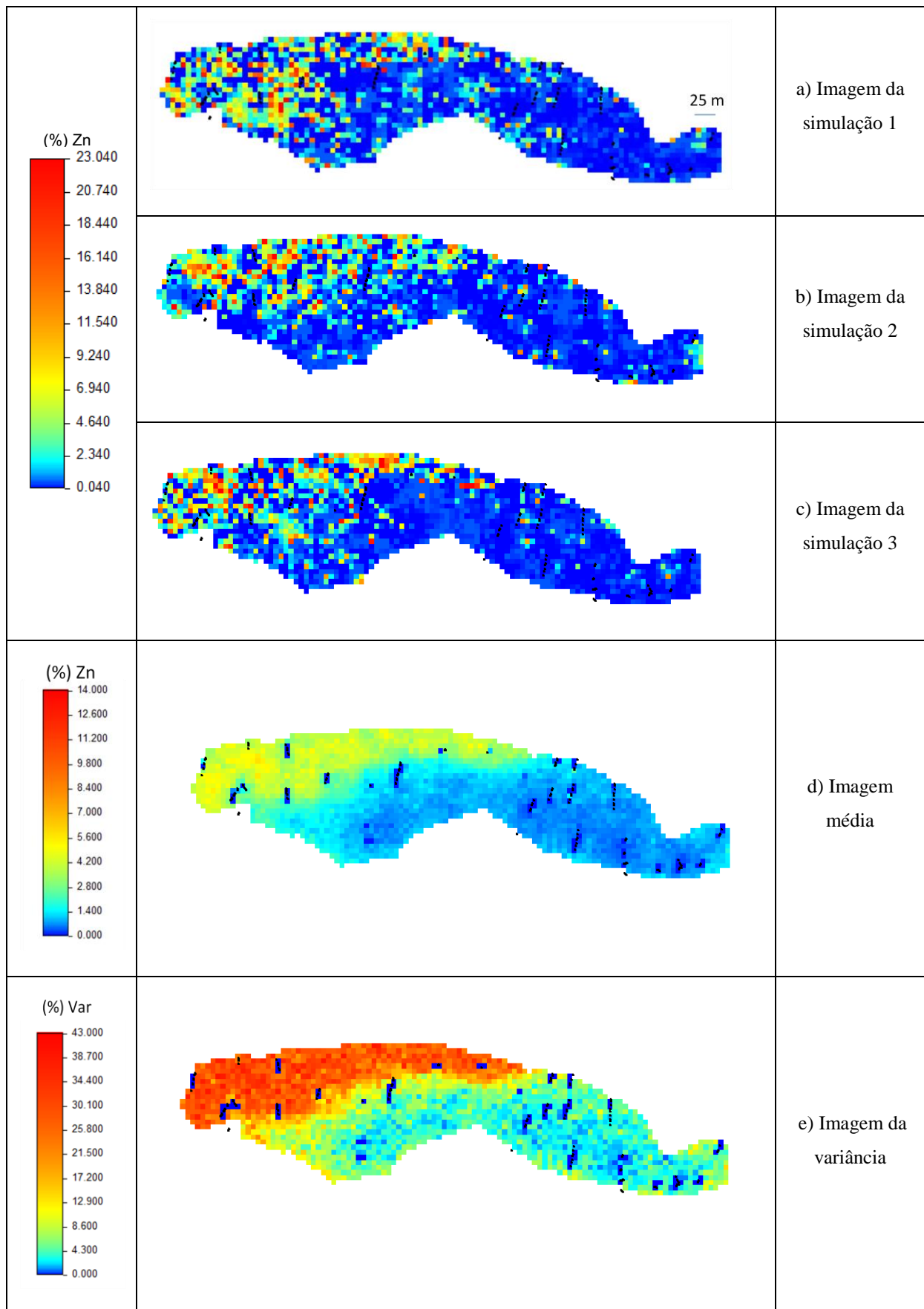


Figura 4.29 Representação em perfil (secção a 61 m), com respectivas legendas, relativamente aos teores de Zn.

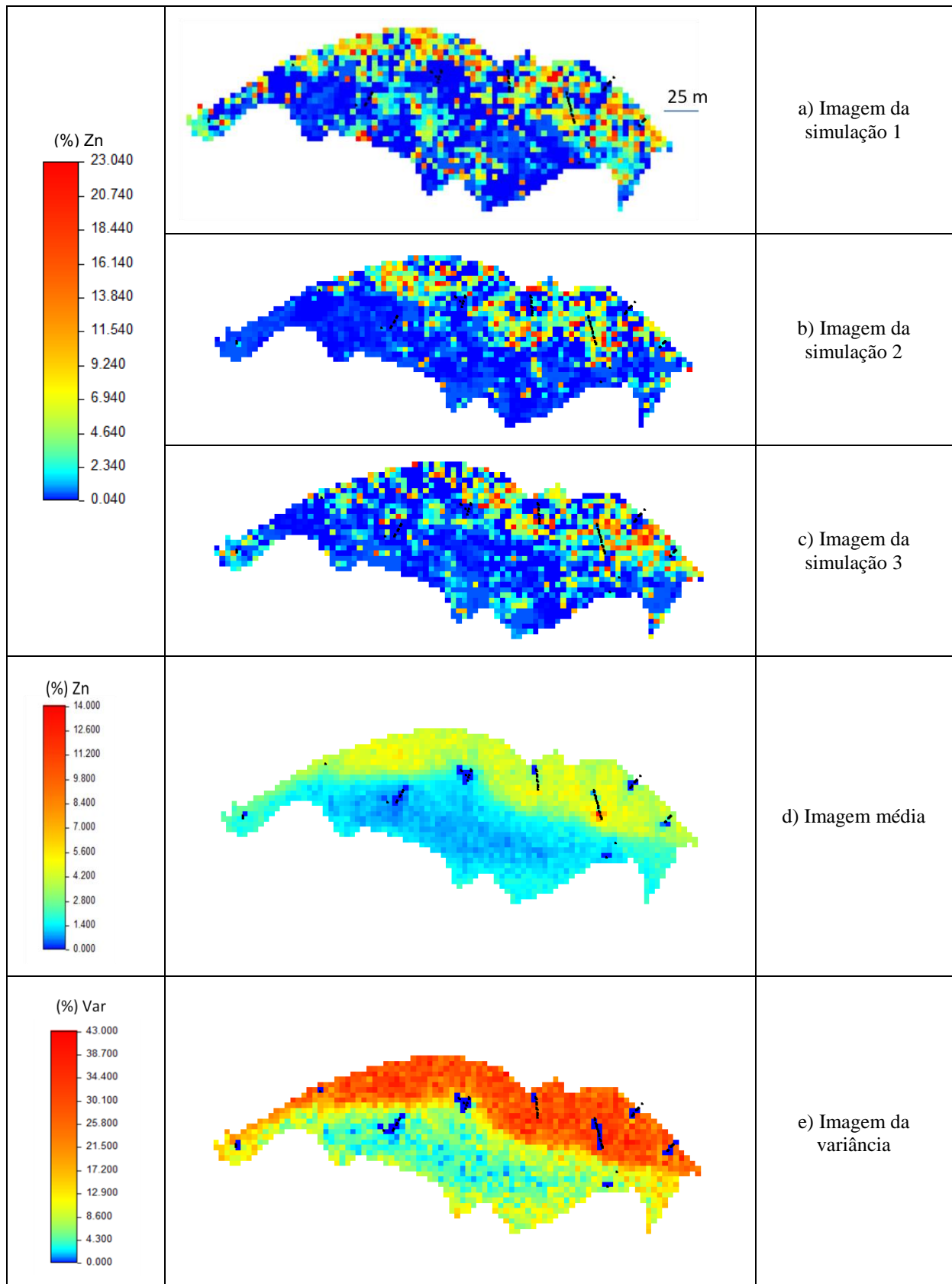


Figura 4.30 Representação em perfil (secção a 41 m), com respectivas legendas, relativamente aos teores de Zn.

Observando as imagens referentes ao cobre percebe-se onde está a separação entre as duas regiões do modelo, dado que os teores são mais elevados no minério maciço. Os teores em ESC são sempre muito mais baixos concordando com o condicionamento com histogramas locais. As figuras 4.27 e 4.28 (d) corroboram a análise: a região I é mais homogênea e é onde ocorrem os teores mais elevados e a região II com teores mais baixos pontualmente elevados por efeito de alguns dados de sondagem. No que respeita às imagens da variância, o modelo tem valores de variância próximos de zero nos blocos atravessados por sondagens, ou nas suas proximidades. Conforme a distância às sondagens aumenta, também aumenta a variância. Localmente, percebe-se uma diferença entre as duas regiões iniciais do modelo: a região I possui valores de variância mais baixos, com algumas exceções, nomeadamente na transição com a região II e com o limite superior (devido a esporádicas ocorrências de ESC).

Para o zinco, as imagens obtidas são notoriamente diferentes, uma vez que o comportamento deste metal difere do cobre, evidenciando ser mais errático. As imagens simuladas mostram teores muito mais altos na região I, tendência não evidente no caso do cobre. Pela imagem média das simulações confirma-se que a segregação dos teores de zinco nos minérios maciço e fissural, todavia pontuada por exceções na proximidade de algumas sondagens. Em termos da variância do modelo de teores de zinco, verifica-se à mesma a influência das sondagens: diminuição da variância com a proximidade. Em termos globais, a variância é mais elevada na região I dado o efeito proporcional ocasionado pela persistência de valores mais elevados.

### **4.5 DISCUSSÃO DE RESULTADOS**

Para avaliar a qualidade da metodologia proposta para este trabalho procurou-se, nesta etapa final, comparar os resultados obtidos pelos vários modelos e destes com os dados originais.

A primeira comparação compreende a observação entre as realizações do modelo de mineralizações obtido por SSI com os teores homólogos de cobre e zinco obtidos por SSD. Na figura 4.31 representam-se as respectivas imagens nos mesmos dois perfis onde se basearam os resultados já apresentados.

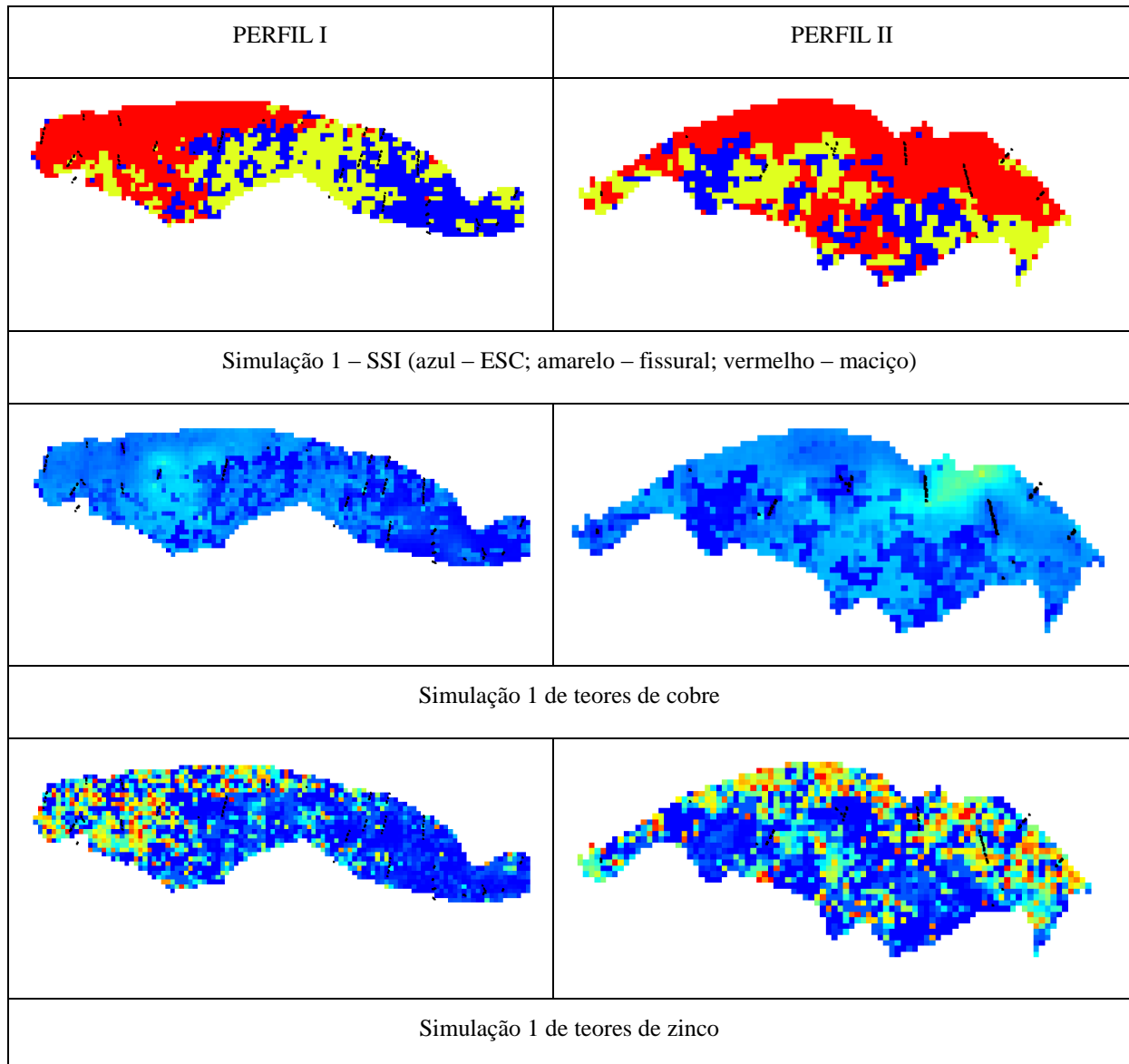


Figura 4.31 Representação comparativa em perfil das imagens simuladas dos tipos de minério e teores em cobre e zinco.

Os blocos atribuídos a ESC no modelo de mineralizações por SSI (a azul) são os que apresentam os teores mais baixos, tanto de cobre como de zinco; os blocos designados para as mineralizações do tipo maciço (M, a vermelho), apresentam os valores mais altos de cobre mas no caso do zinco esta evidência não é tão evidente, onde ocorrem também valores muito baixos. No caso do cobre e do zinco, os minérios dos tipos M e F têm teores da mesma ordem de grandeza.

Para confirmar esta apreciação, apresentam-se nas figuras 4.32 e 4.33 os histogramas cumulativos condicionais do cobre e zinco para os três tipos de minério estudados.

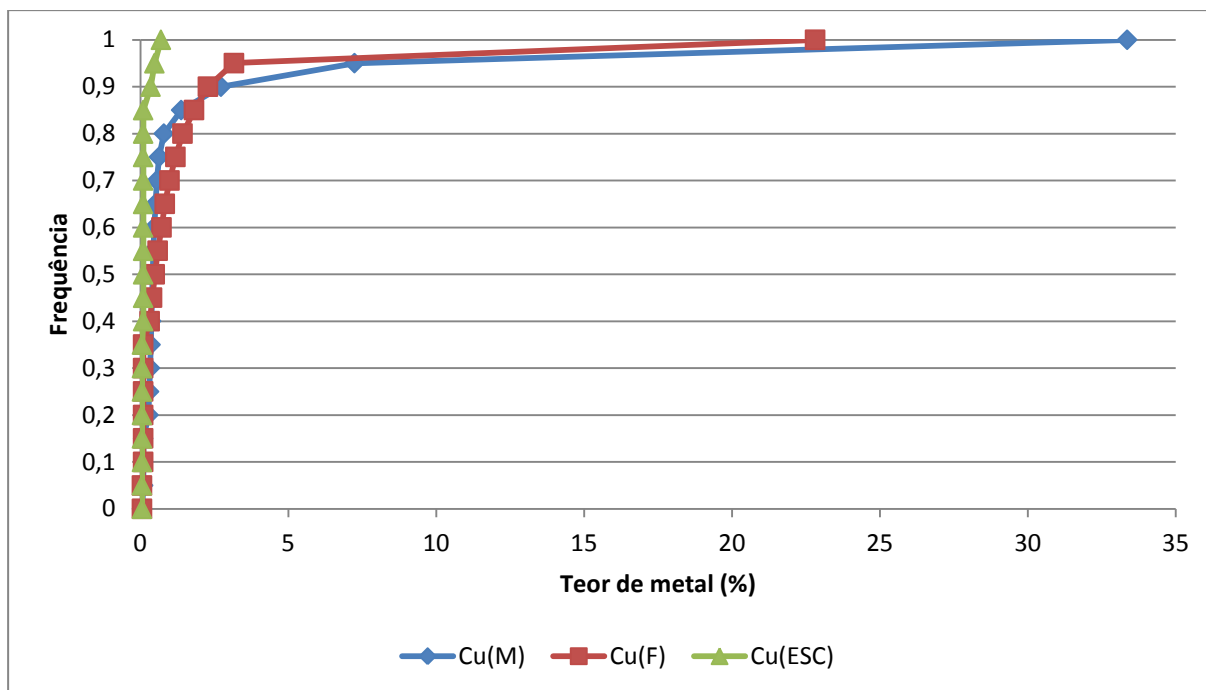


Figura 4.32 Curvas cumulativas condicionais para o cobre por tipo de minério.

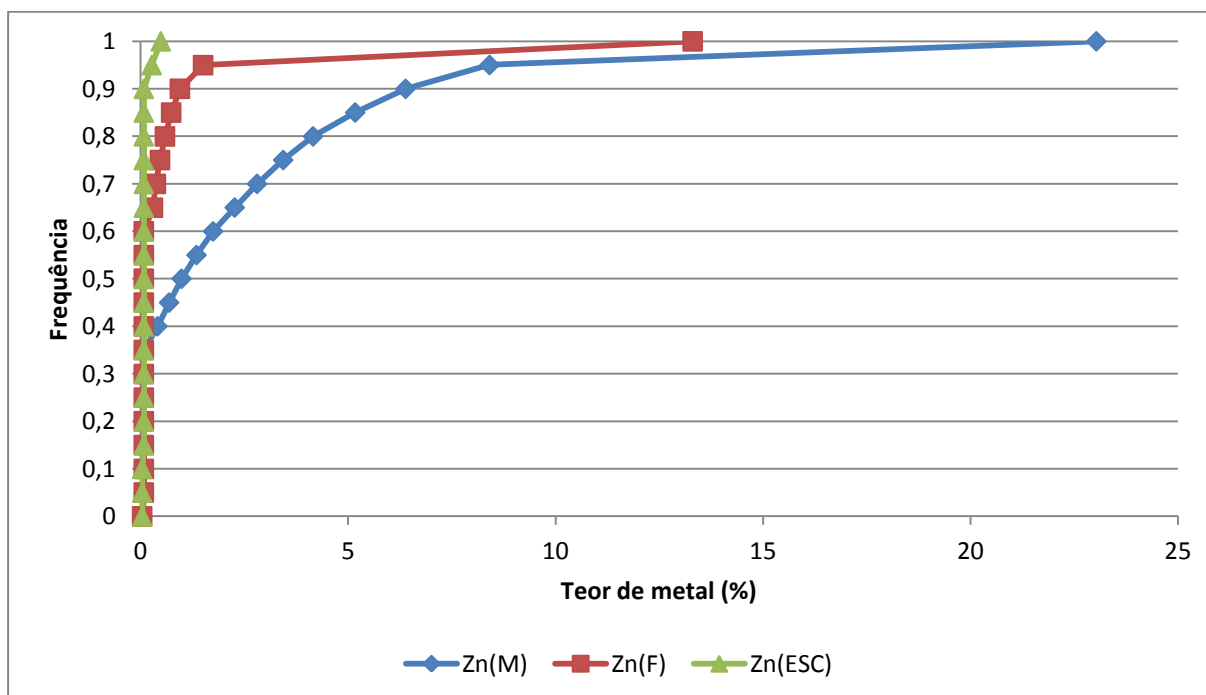


Figura 4.33 Curvas cumulativas condicionais para o zinco por tipo de minério.

Estas curvas confirmam que os teores de cobre em ESC são os mais baixos, mas praticamente não existe discriminação de teores entre os minérios F e M. Para o zinco observa-se uma maior segregação entre todos os tipos de minério, onde ESC tem os teores mais baixos, a que

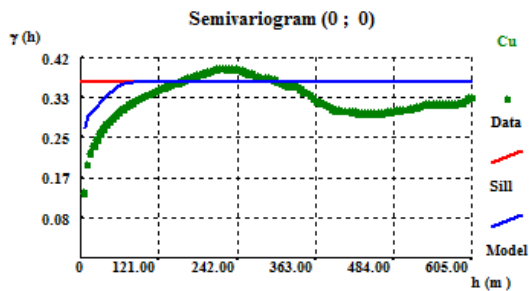
se segue o F e o M com teores francamente mais altos. Em todos os casos existe sempre uma percentagem muito significativa de sobreposições na gama de teores mais baixos, ou seja, ocorrem teores baixos em todos os tipos de minério.

Confirma-se que a tendência das ocorrências de ESC, F e M dos dados condicionais às mineralizações é coincidente com as imagens do modelo de teores de cobre e zinco, que reflecte integralmente os histogramas cumulativos dos dados de partida que são apresentados.

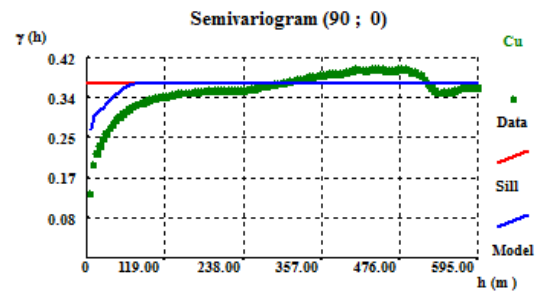
Calcularam-se variogramas de uma imagem simulada do modelo de teores para o cobre, e outra para o zinco, e sobrepôs-se o modelo de variograma com os mesmos parâmetros ajustados anteriormente. Este teste destina-se a confirmar a reprodução dos modelos de variograma por parte das imagens simuladas.

Nas figuras 4.34 e 4.35 ilustram-se esses mesmos variogramas para as três direcções ortogonais coincidentes com os eixos coordenados, juntamente com as funções teóricas ajustadas aos dados experimentais. Note-se que os patamares das funções foram re-escalados para as pequenas diferenças na variância dos valores.

$$\text{Sph}_1 (C_1=0,278, a_1= 7.5\text{m})+\text{Sph}_2 (C_2=0,089, a_2=80\text{m})$$



$$\text{Sph}_1 (C_1=0,278, a_1= 7.5\text{m})+\text{Sph}_2 (C_2=0,089, a_2=80\text{m})$$



$$\text{Sph}_1 (C_1=0,278, a_1= 7.5\text{m})+\text{Sph}_2 (C_2=0,089, a_2=80\text{m})$$

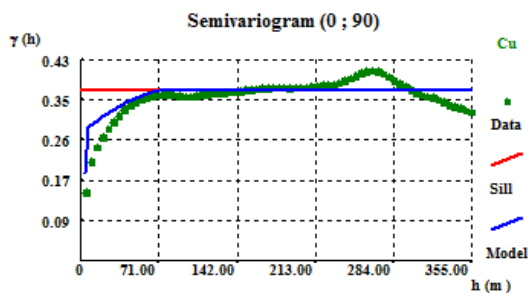
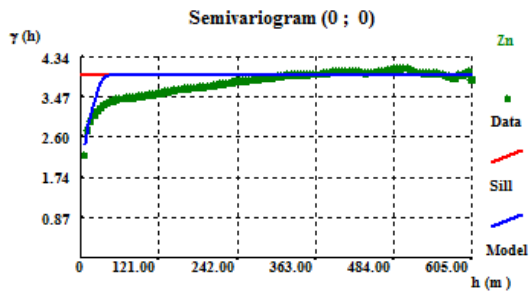
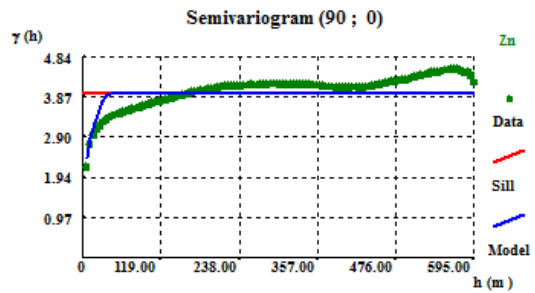


Figura 4.34 Variogramas experimentais de uma imagem simulada de cobre e variogramas ajustados aos dados experimentais.

$$\text{Sph}_1 (C_1=2,071, a_1= 7\text{m})+\text{Sph}_2 (C_2=1,876, a_2=40\text{m})$$



$$\text{Sph}_1 (C_1=2,071, a_1= 7\text{m})+\text{Sph}_2 (C_2=1,876, a_2=40\text{m})$$



$$\text{Sph}_1 (C_1=2,071, a_1= 7\text{m})+\text{Sph}_2 (C_2=1,876, a_2=40\text{m})$$

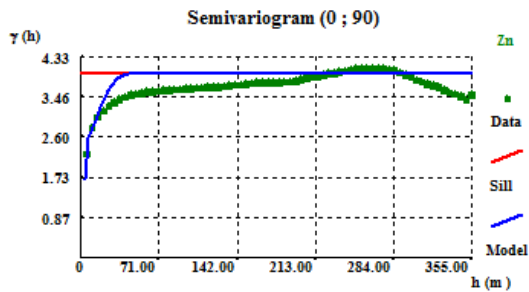


Figura 4.35 Variogramas experimentais de uma imagem simulada de zinco e variogramas ajustados aos dados experimentais.

É perceptível o aumento da amplitude dos variogramas da simulação em relação ao modelo ajustado aos dados experimentais, tanto para o cobre (figura 4.34) como para o zinco (figura 4.35). A direcção vertical (0; 90) para o cobre e a E-W (90; 0) para o zinco são as que têm os variogramas com o melhor ajuste. Esta diferença de amplitudes pode estar relacionada com: (1) o facto das variáveis serem assimétricas; (2) os dados não estarem distribuídos uniformemente pela área em estudo; (3) a simulação dos teores ser condicional a um mosaico de tipos de minério. Uma possibilidade para aproximar os modelos de variograma seria simular propositadamente com uma amplitude mais baixa por tentativa e erro.

Por último, validaram-se as médias de cobre e zinco obtidas por SSD com as médias calculadas pelas sondagens (tabela 4.6). Esta comparação é em tudo semelhante à comparação das quantidades de metal conforme calculadas pelos dados de partida e com os valores simulados.

Tabela 4.6 – Tabela comparativa de valores médios de cobre e zinco calculados com os dados experimentais e com os resultados da simulação.

	Tipo de Mineralização	Dados Reais (%)	Simulações		
			Min (%)	Média (%)	Max(%)
Cu	ESC	0,13	0,12	0,13	0,14
	F	0,91	0,86	0,88	0,90
	M	1,44	1,38	1,40	1,43
Zn	ESC	0,09	0,10	0,11	0,12
	F	0,38	0,47	0,50	0,53
	M	2,27	2,69	2,77	2,92

Por análise da tabela é perceptível que em grande parte dos casos a média dos dados experimentais está no intervalo dos valores simulados, e até próximo da respectiva média, todavia há várias exceções. Tomando o cobre, os dados para ESC permanecem inalterados, enquanto que para as mineralizações observa-se uma ligeira diminuição dos teores médios nos tipos de minério F e M. Para o zinco, verifica-se o contrário. A média dos teores associados à rocha encaixante é onde se verifica menor divergência de resultados, apesar de que está sempre presente um aumento da média dos resultados obtidos na simulação em relação aos dados originais. Para despistar alguma possibilidade enviesamento dos resultados é recomendável fazer uma estimação dos teores por krigagem que proceda ao desagrupamento das amostras e confirme os resultados. De salientar que a estimação levada a cabo por Charifo et al. (2013) confirmou que a aplicação da metodologia de SSD com histogramas locais não gera sub ou sobre estimação mesmo se os histogramas dos teores forem assimétricos.

#### 4.6 CÁLCULO DE RESERVAS

Para finalizar o caso de estudo realizou-se o cálculo de reservas em termos da quantidade de metal de cobre e zinco disponíveis no depósito mineral do Zambujal. Para calcular a densidade média por tipo de minério, representaram-se os histogramas condicionais e calcularam-se as respectivas estatísticas univariadas (Figura 4.36 a 4.38). Os resultados apresentam-se nas tabelas 4.7 e 4.8.

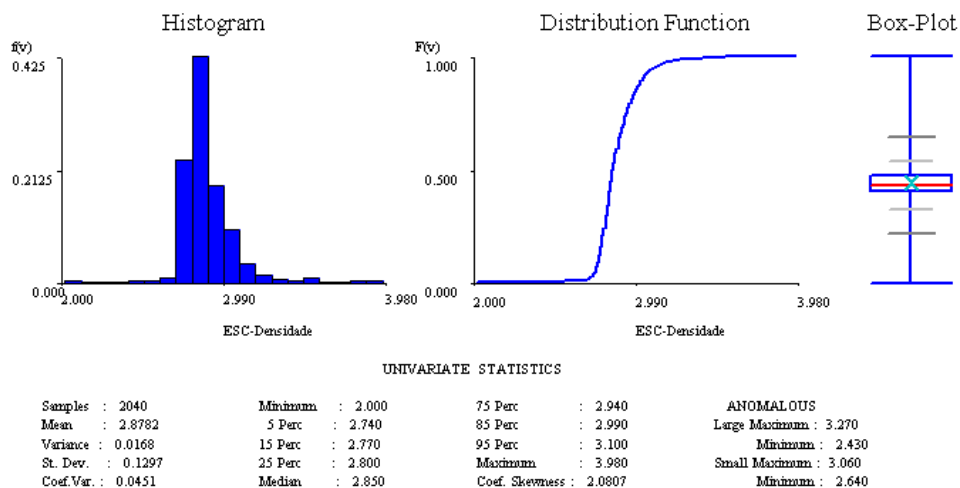


Figura 4.36 Análise univariada para a densidade da rocha encaixante (ESC).

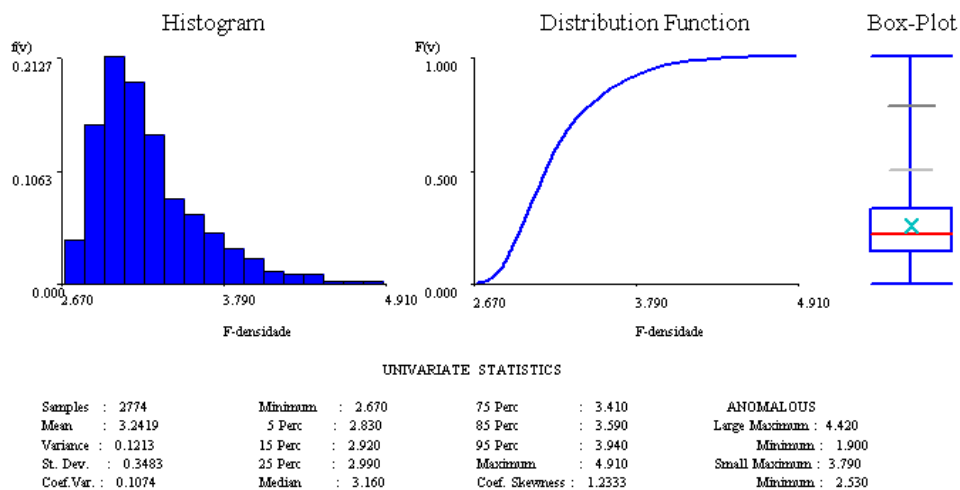


Figura 4.37 Análise univariada para a densidade das mineralizações do tipo fissural (F).

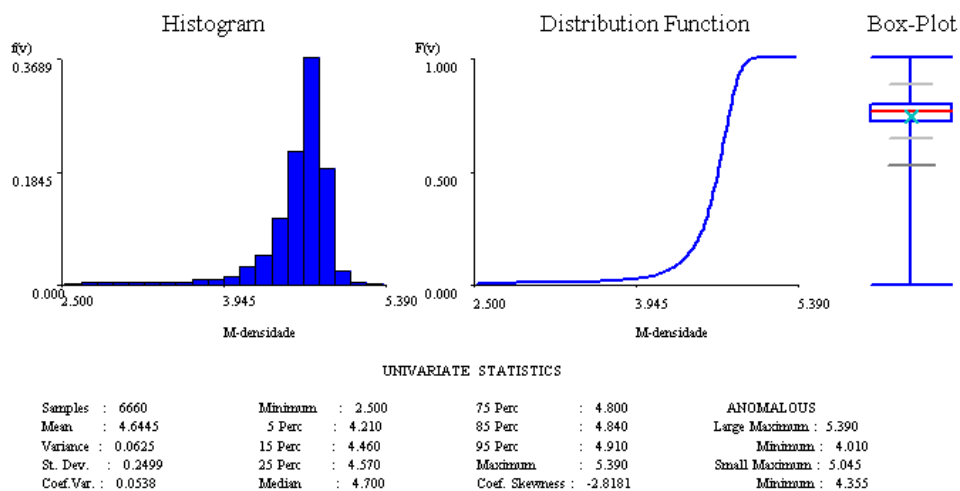


Figura 4.38 Análise univariada para a densidade das mineralizações do tipo maciço (M).

Tabela 4.7 – Síntese das reservas em minério e metal para o cobre no depósito mineral do Zambujal.

	Número blocos	Volume (m <sup>3</sup> )	Teor médio (%)	Densidade média	Q <sub>minério</sub> (tons)	Q <sub>metal</sub> (tons)
<b>ESC</b>	306 145	38 268 125	0,13	2,88	110 212 200	143 276
<b>F</b>	336 671	42 083 875	0,88	3,24	136 351 755	1 199 895
<b>M</b>	411 264	51 408 000	1,40	4,64	238 533 120	3 339 464
<b>Total</b>	1 054 080	131 760 000	0,96		485 097 075	4 682 635

Tabela 4.8 – Síntese das reservas em minério e metal para o zinco no depósito mineral do Zambujal.

	Número blocos	Volume (m <sup>3</sup> )	Teor médio (%)	Densidade média	Q <sub>minério</sub> (tons)	Q <sub>metal</sub> (tons)
<b>ESC</b>	306 145	38 268 125	0,11	2,88	110 212 200	121 233
<b>F</b>	336 671	42 083 875	0,50	3,24	136 351 755	681 759
<b>M</b>	411 264	51 408 000	2,77	4,64	238 533 120	6 607 367
<b>Total</b>	1 054 080	131 760 000	1,53		485 097 075	7 410 360

Para o cobre (tabela 4.7) a reserva total é de 4 682 635 toneladas, das quais cerca de 2/3 podem ser encontradas nas mineralizações do tipo maciço. Para o zinco (tabela 4.8) a quantidade de metal total é de 7 410 360 toneladas, aqui maioritariamente pertencentes a mineralizações do tipo maciço. Como seria de esperar, as reservas de cobre e zinco são bastante reduzidas na rocha encaixante (ESC), respectivamente 3% e 1,6% dos totais de cobre e zinco.



## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objectivo a apresentação e experimentação de uma metodologia de modelação morfológica e de teores, aplicada à massa mineralizada do Zambujal. Como um todo a metodologia é experimental e tem um articulado inovador quando aplicada a este tipo de mineralizações.

Na sequencia deste trabalho podem ser enumeradas as seguintes características em jeito de conclusões por item:

a) Modelo determinista dos tipos de minério:

- i. As mineralizações do tipo maciço ocorrem predominantemente no topo das mineralizações do tipo fissural;
- ii. O volume é facilmente subdividido em duas regiões principais para o estudo preliminar: região I com ocorrências de minério essencialmente maciço e região II com ocorrências predominantes de minério fissural;
- iii. Os veios mineralizados intercalados com rocha encaixante (xistos e grauvaques) são o que compõem o minério do tipo fissural, deste modo, existem mais ocorrências de ESC na região II (predominantemente fissural);
- iv. A transformação do modelo geométrico vectorial para uma estrutura matricial ocorreu sem ambiguidades, isto é, cada bloco foi transformado de forma inequívoca numa modalidade 1, 2 ou *nodata*.

b) Modelo estocástico dos tipos de minério:

- i. Quando é feita a reconciliação entre a geometria das regiões I e II com os dados das sondagens, observa-se que ocorrem mineralizações de tipo M na região II e de tipo F na região I. O modelo estocástico serve precisamente para aumentar a resolução espacial e, simultaneamente, desfazer as incorrecções não capturadas à escala da digitalização dos perfis. Da mesma forma, o tipo ESC que não foi digitalizado passará a estar discriminado na malha de blocos.
- ii. A proporção dos tipos de minério ESC e F na região II é muito semelhante o que introduz uma considerável incerteza no modelo na área da região II, enquanto que na região I os valores de incerteza tenderão a permanecer baixos.
- iii. Relativamente à incerteza (imagem da entropia), os valores mantêm-se próximos de zero no interior da região I, e aumentam próximo dos limites,

tanto do superior como da interface com a região II, onde prevalecem muito elevados com exceção na proximidade das sondagens. Este facto deriva como foi referido no ponto anterior por se introduzir a discriminação entre F e o ESC e a repartição ser quase em igual proporção.

- iv. Uma vez que tanto as imagens médias como a imagem da entropia apresentam-se bastante atenuadas, o numero de 200 realizações é satisfatório para reproduzir e quantificar a incerteza.

c) Modelo estocástico de teores de cobre e zinco:

- i. No geral a transição de teores entre as duas regiões é atenuada.
- ii. Os teores em ESC são sempre muito mais baixos concordando com o condicionamento com histogramas locais.
- iii. Para o cobre, a região I é homogénea e tem os teores mais altos; a região II inclui manchas de zonas correspondentes aos teores mais baixos observados (indicativas da presença de rocha encaixante), intercaladas com outros blocos com teores mais altos semelhantes aos da região I (blocos com probabilidade de pertencerem a minério fissural);
- iv. Para o zinco, o modelo é claramente distinto - uma vez que o comportamento deste metal difere do presenciado pelo cobre, evidenciando ser mais errático - com uma distribuição desordenada dos blocos de teores mais altos na região I. Na região II, apesar de existirem blocos com teores igualmente elevados, na sua maioria os blocos apresentam teores mais baixos.
- v. No geral, os modelos para o cobre e o zinco apresentam variância / incerteza próximos de zero nos blocos atravessados por sondagens, ou nas suas proximidades sinal da repetição dos resultados das simulações.
- vi. Especificamente, para o modelo de cobre, percebe-se uma diferença entre as duas regiões iniciais do modelo: a região I possui valores de variância próximos de zero em quase toda a sua extensão, com algumas exceções, nomeadamente nas zonas de transição com a região II e com o limite superior (devido a esporádicas ocorrências de ESC).
- vii. Localmente, o modelo de teores de zinco é o que mais diverge em termos da variância entre as duas regiões. A região I com variância mais alta, com uma diminuição gradual na transição para a região II, que apresenta valores de variância mais baixos.

- viii. A validação foi satisfatória para os critérios analisados, com exceção dos testes da variografia, para os quais não se obtiveram boas coincidências nos modelos das imagens simuladas com o dos variogramas experimentais. Vários factores podem estar na origem da diferença de amplitudes entre os variogramas, nomeadamente o próprio condicionamento a histogramas locais.

Este trabalho incide na experimentação de uma metodologia com um articulado inovador para um caso de estudo real de um depósito mineral. Como é construída no campo da simulação, origina vários cenários equiprováveis e, simultaneamente, imagens de valores médios e de incerteza local que podem ser utilizados na fase de detalhe do planeamento mineiro de longo prazo, testando sequências de exploração até ser obtida a configuração técnica e económica mais adequada.



## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, J.A., Soares, A. & Reynaud, R. (1993) Modelling the Shape of Several Marble Types in a Quarry. Proceedings of the XXIV International Symposium APCOM, Montreal, vol. 3: 452-459.
- Almeida, A. (1999) Use of Geostatistical Model to Improve Reservoir Description and Flow Simulation in Heterogeneous Oil Fields, Tese de Doutoramento, IST-UTL.
- Almeida, J.A. (2010) Stochastic simulation methods for characterization of lithoclasses in carbonate reservoirs. *Earth Science Reviews*, (101), 3-4, 250-270.
- Carvalho, P. & Ferreira, A. (1994) Geologia de Neves Corvo: estado actual do conhecimento, II Simp. Sulfuretos polimetálicos da Faixa Piritosa Ibérica, Évora. *Portugal Mineral*, 36(8), p. 7– 8.
- Charifo, G. (2008) Caracterização e Avaliação de reservas Geológicas do Depósito Mineral de Farim-Saliquinhé, Tese de Mestrado, FCT-UNL.
- Charifo, G., Almeida, J. A. & Ferreira, A. (2013) Managing borehole samples of unequal lengths to construct a high-resolution mining model of mineral grades zoned by geological units. *Journal of Geochemical Exploration* 132, 209-223.
- Gaspar, L. M. (2006) Apontamentos de Recursos Minerais Metálicos - Jazigos de Sulfuretos Maciços, Departamento de Geologia da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.
- Gaspar, O. & Pinto, A. (1991) The ore textures of Neves-Corvo volcanogenic massive sulphides and their implications for ore beneficiation, *Mineralogical Magazine* Vol. 55, p. 417–422.
- Marques, E. A. R. (2011) Caracterização de Reservatórios Petrolíferos. Análise comparativa de dois métodos para a caracterização de propriedades de um reservatório petrolífero, Tese de Mestrado, IST.

- Matias, F. V. (2010) Modelação 3D de um subsector das Mineralizações Auríferas de Casanovas, Montemor-o-Novo, Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.
- Matias, F., Almeida, J.A. & Chichorro, M. (2010) 3D Modelling of a subsector of Casas Novas gold mineralization, Montemor-o-Novo, Portugal. Proceedings of the 30th gOcad meeting, Nancy.
- Nunes, R. & Almeida, J. A. (2010) Parallelization of sequential Gaussian, indicator and direct simulation algorithms. *Computers & Geosciences*, 36, 1042-1052.
- Pacheco, N., Ferreira, A., Noiva, P. & Barriga, G. (2003) The usual surprise called Neves-Corvo, em Kelly, J.G., Andrew, C.J., Ashton, J.H., Boland, M.B., Earls, G., Fusciardi, L., and Stanley, G., eds., *Europe's major base metal deposits: Dublin, Ireland*, Irish Association for Economic Geology, p. 391-404.
- Relvas, J., Tassinari, C., Munhá, J. & Barriga, F. (2001) Multiple sources for ore-forming fluids in the Neves Corvo VHMS Deposit of the Iberian Pyrite Belt (Portugal): strontium, neodymium and lead isotope evidence, *Mineralium Deposita*, Vol. 36, p. 416-427.
- Relvas, J., Barriga, F., Pinto, A., Ferreira, A., Pacheco, N., Noiva, P., Barriga, G., Baptista, R., Carvalho, D., Oliveira, V., Munhá, J. & Hutchinson, R. (2002) The Neves-Corvo Deposit, Iberian Pyrite Belt, Portugal: Impacts and Future, 25 Years after the Discovery, *Society of Economic Geologists, Special Publication*, Vol. 9, Chapter 8, p. 1-22.
- Soares, A (2001) Direct sequential Simulation and Cosimulation, *Mathematical Geology*, 33(8), p. 911–926.
- Soares, A. (2006) *Geostatística para as ciências da terra e do ambiente*, Segunda edição, IST Press, Instituto Superior Técnico, Lisboa.

**ANEXO I – Gráficos das curvas acumulativas condicionais de Zn, Cu e Sn por tipo de minério**

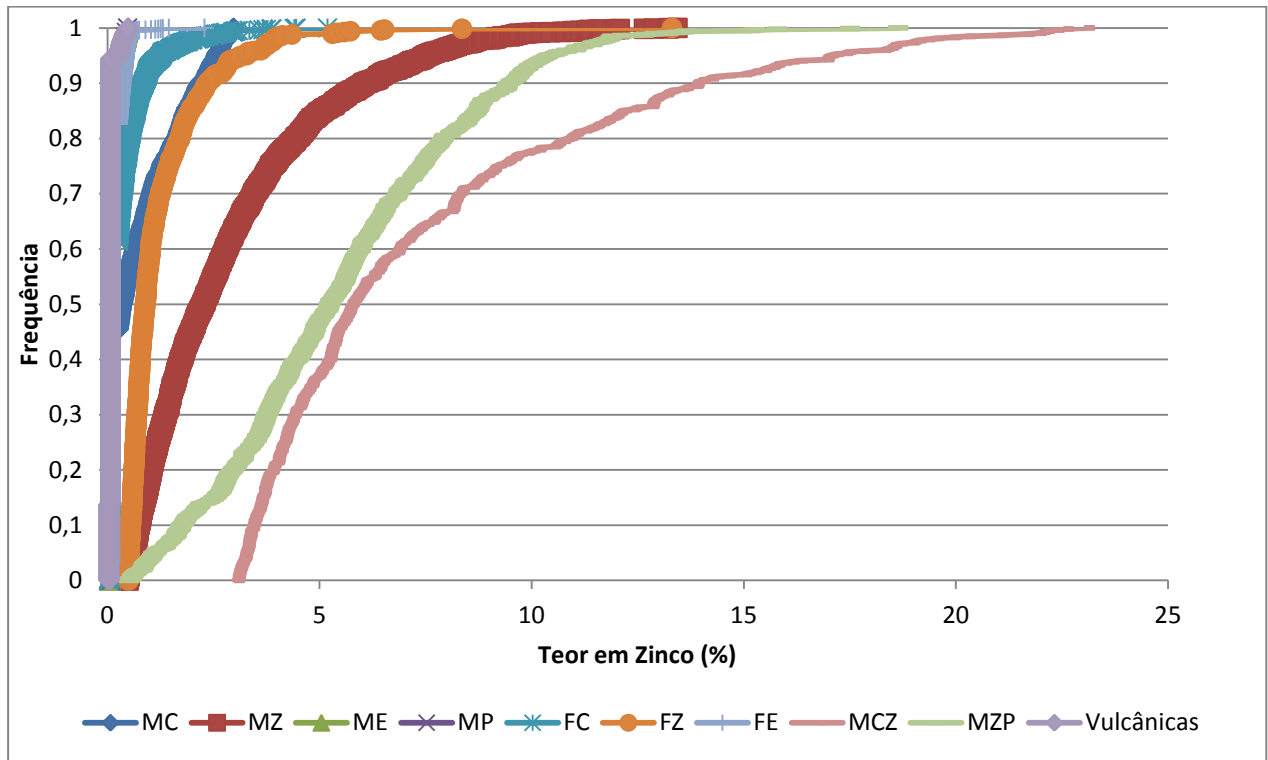


Figura I.1 - Curvas acumulativas dos teores de zinco para as várias litologias.

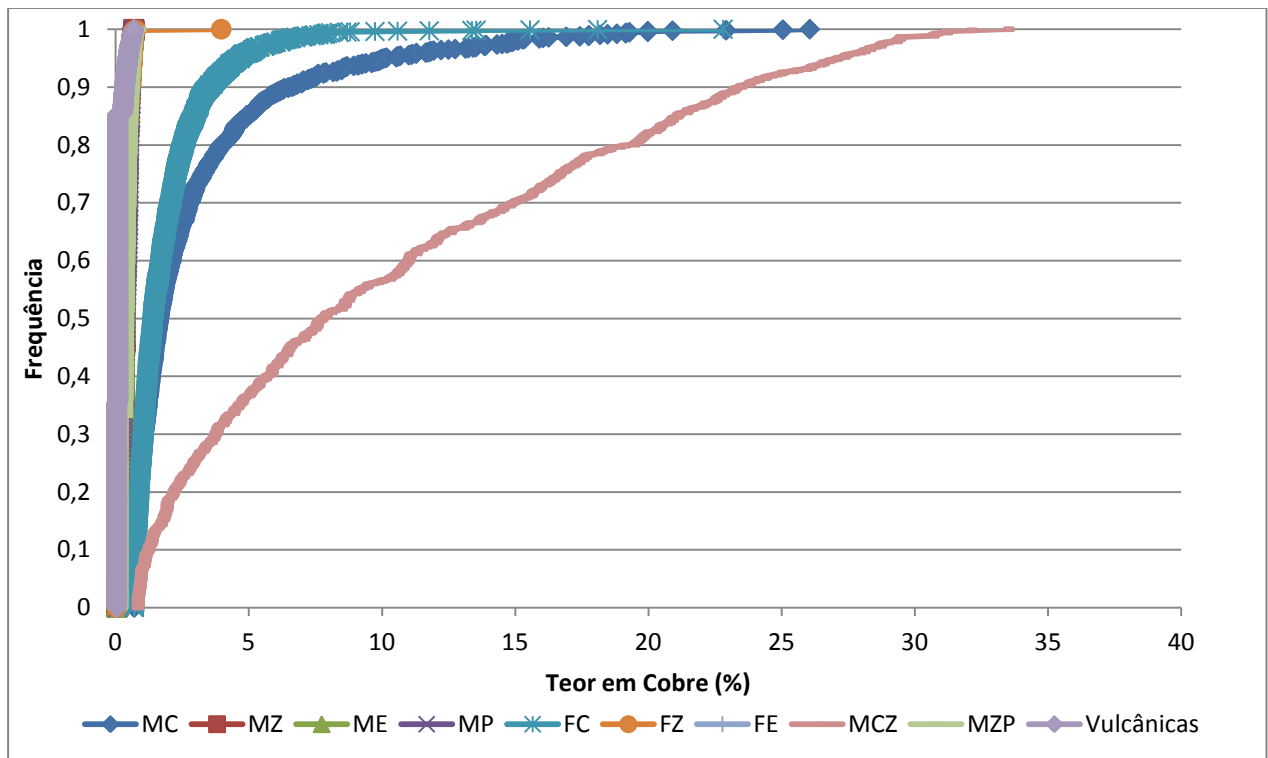


Figura I.2 - Curvas acumulativas dos teores de cobre para as várias litologias.

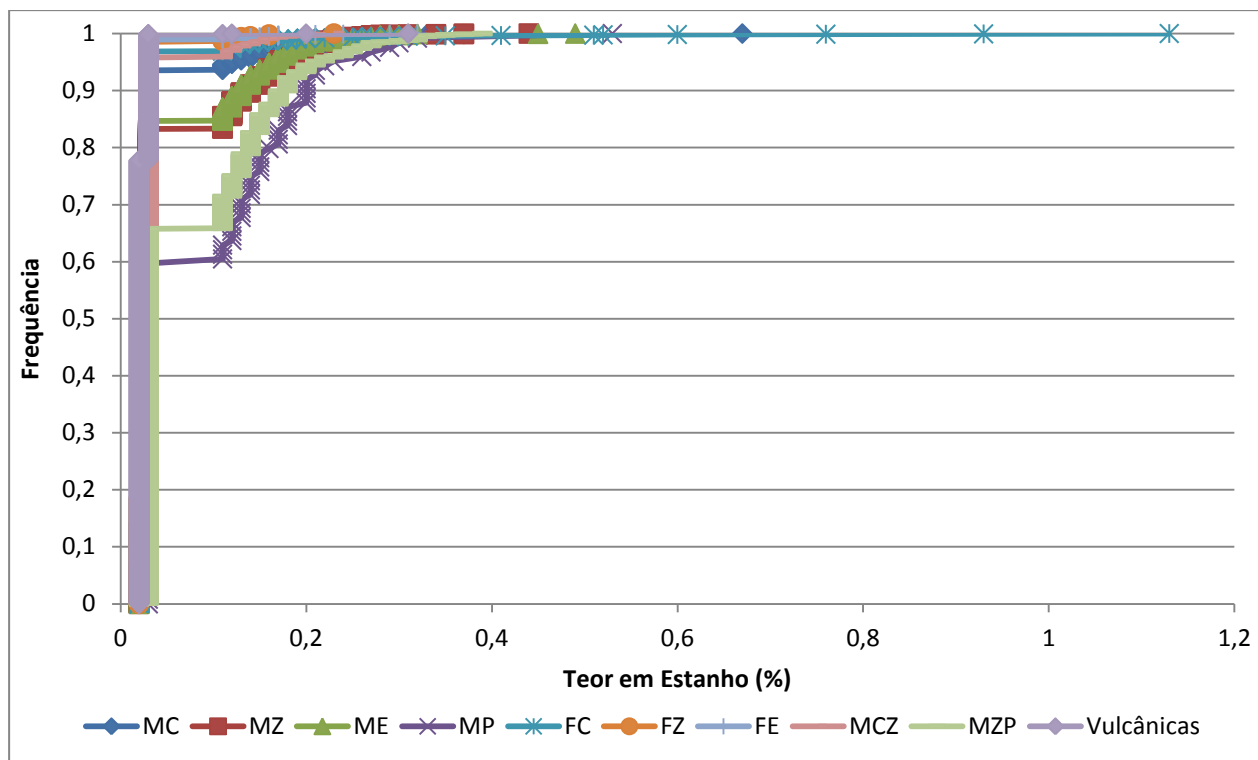


Figura I.3 - Curvas acumulativas dos teores de estanho para as várias litologias.

## ANEXO II – Análise univariada

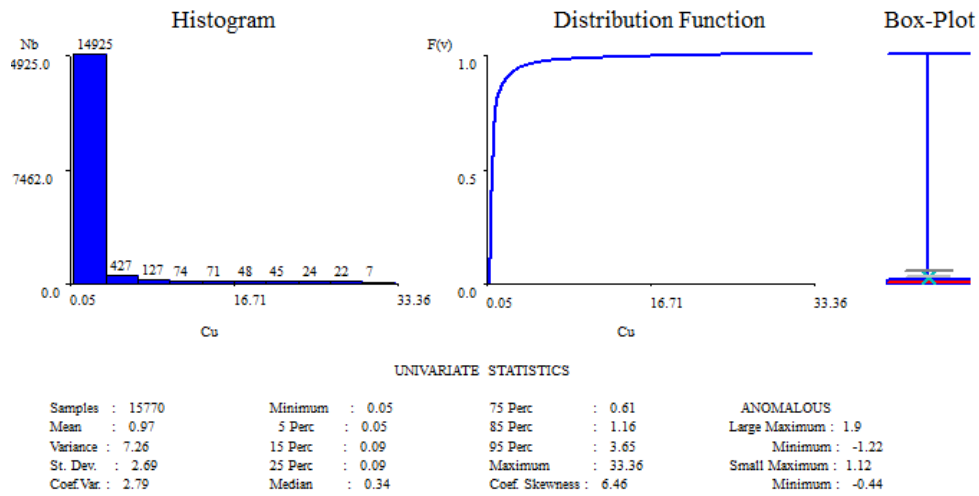


Figura II.1 - Análise univariada para o Cu.

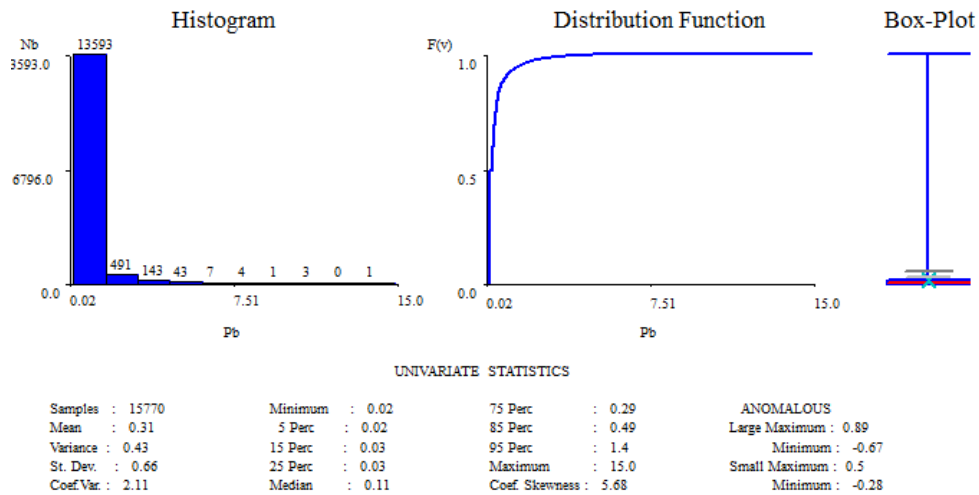


Figura II.2 - Análise univariada para o Pb.

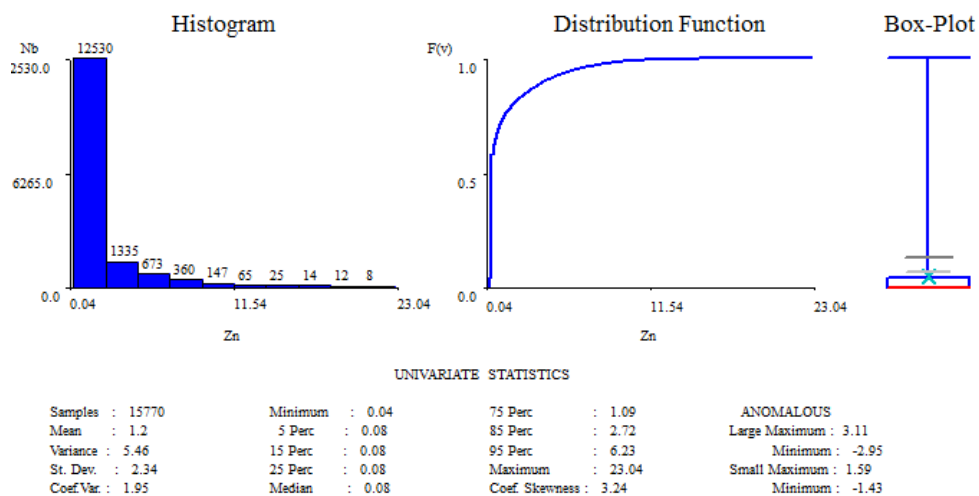


Figura II.3 - Análise univariada para o Zn.

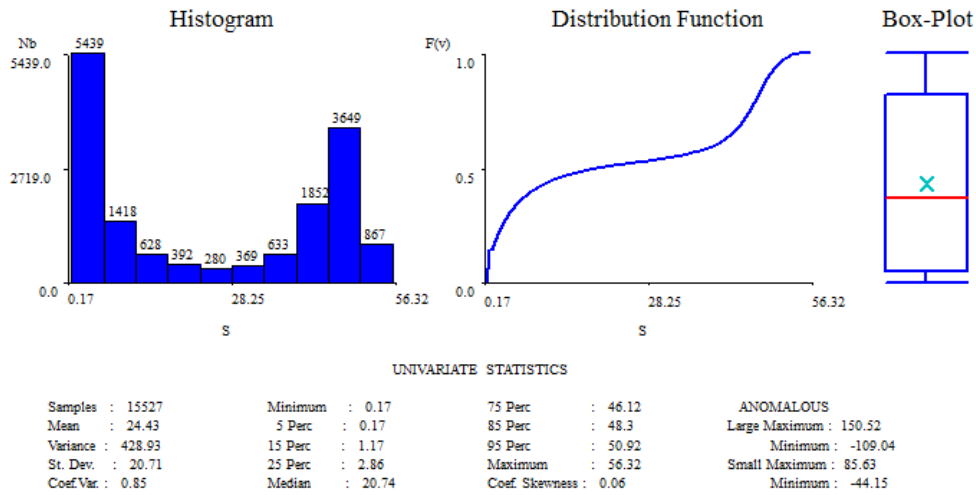


Figura II.4 - Análise univariada para o S.

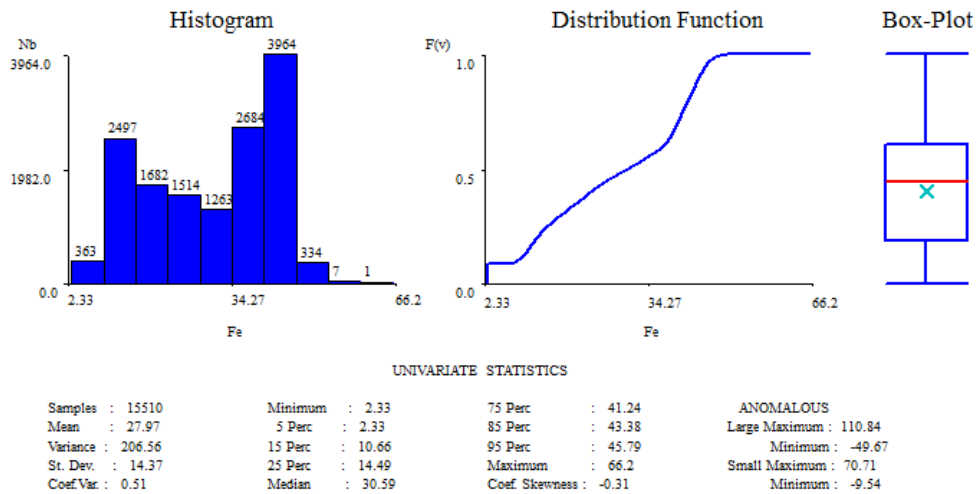


Figura II.5 - Análise univariada para o Fe.

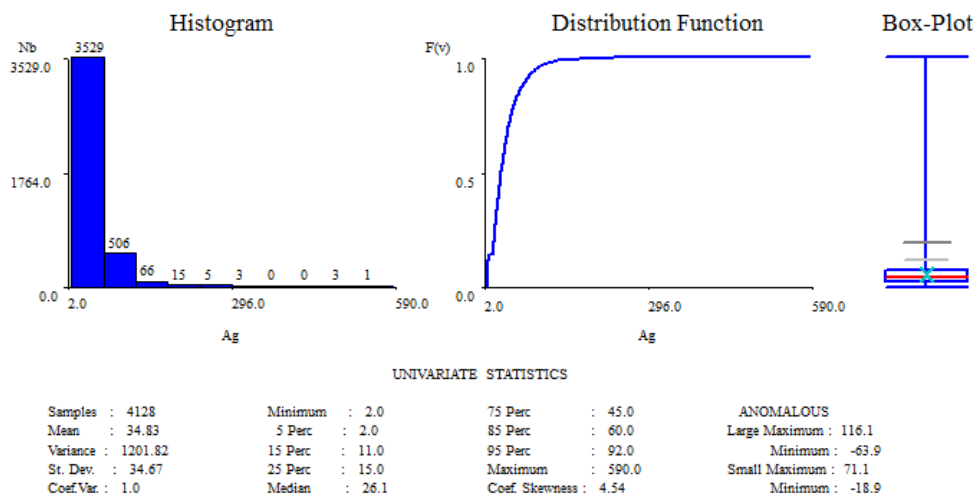


Figura II.6 - Análise univariada para a Ag.

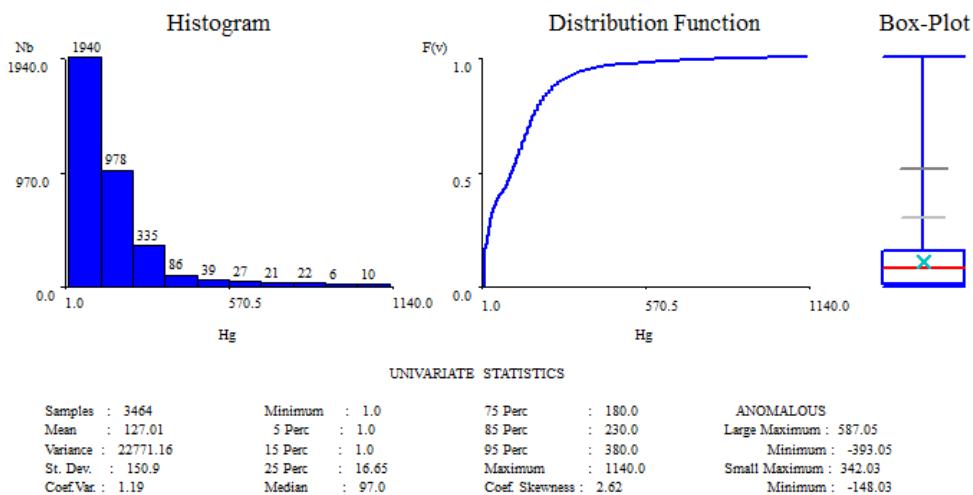


Figura II.7 - Análise univariada para o Hg.

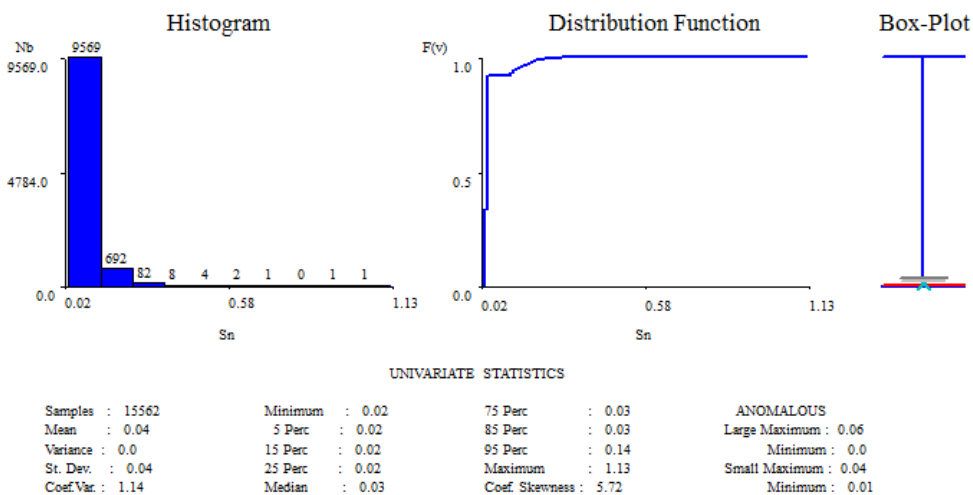


Figura II.8 - Análise univariada para o Sn.

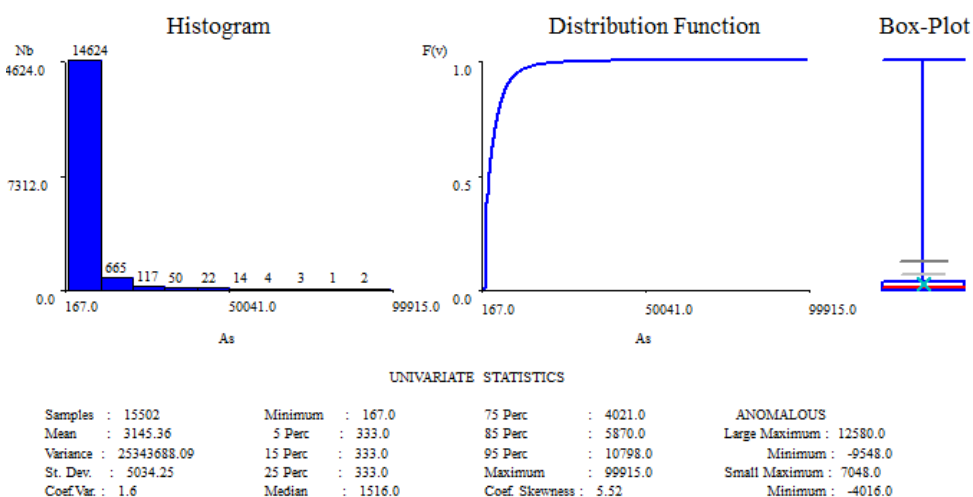


Figura II.9 - Análise univariada para o As.

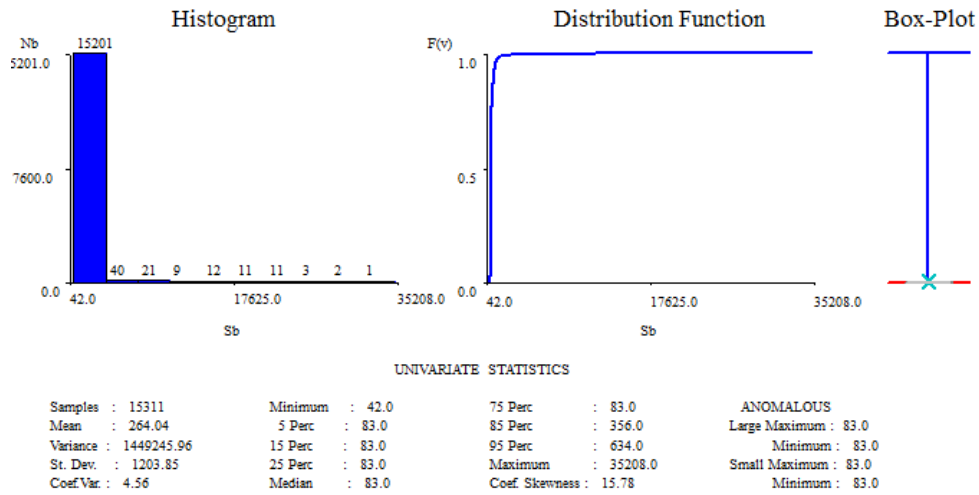


Figura II.10 - Análise univariada para o Sb.

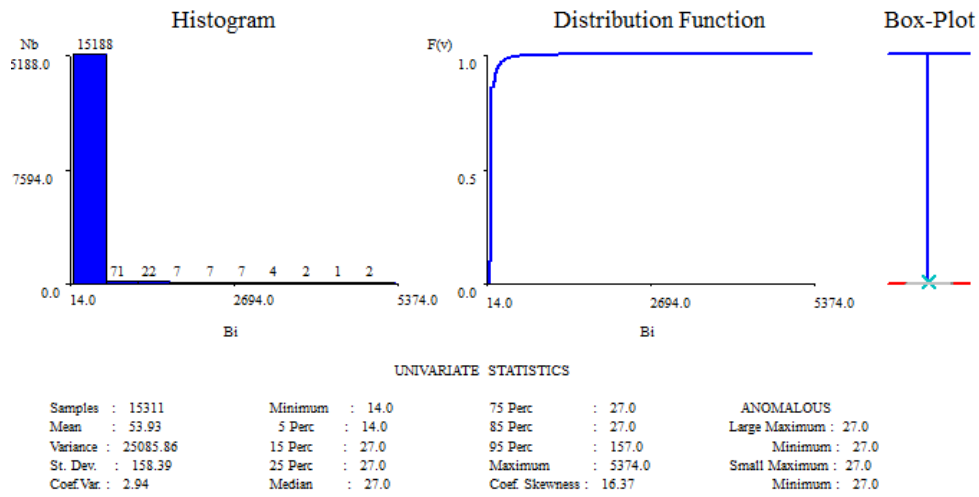


Figura II.11 - Análise univariada para o Bi.

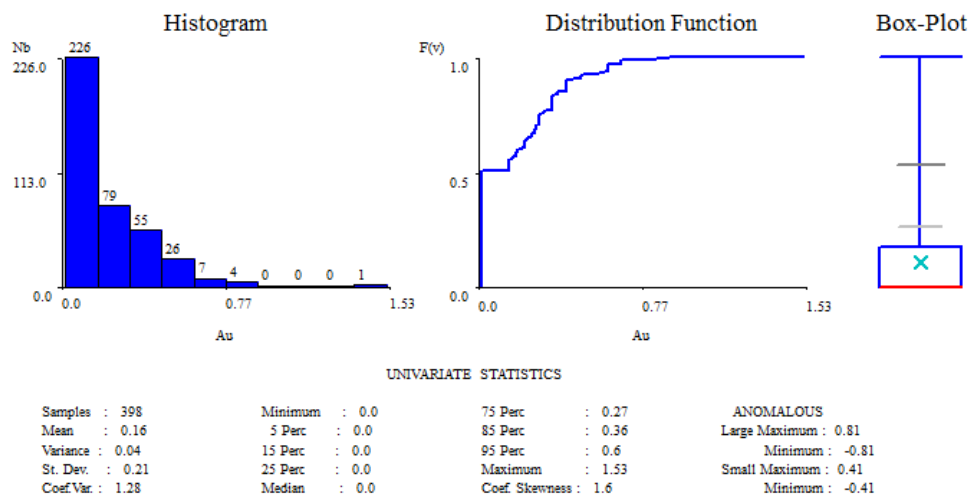


Figura II.12 - Análise univariada para o Au.

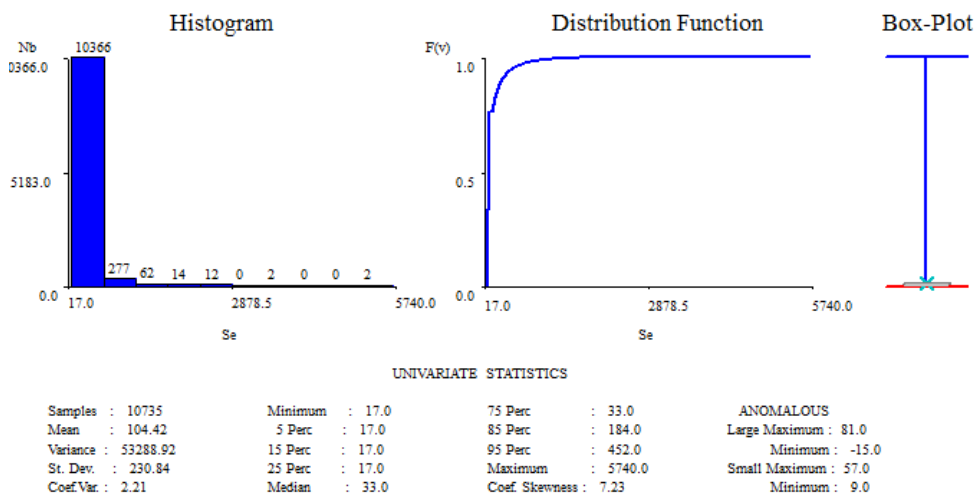


Figura II.13 - Análise univariada para o Se.

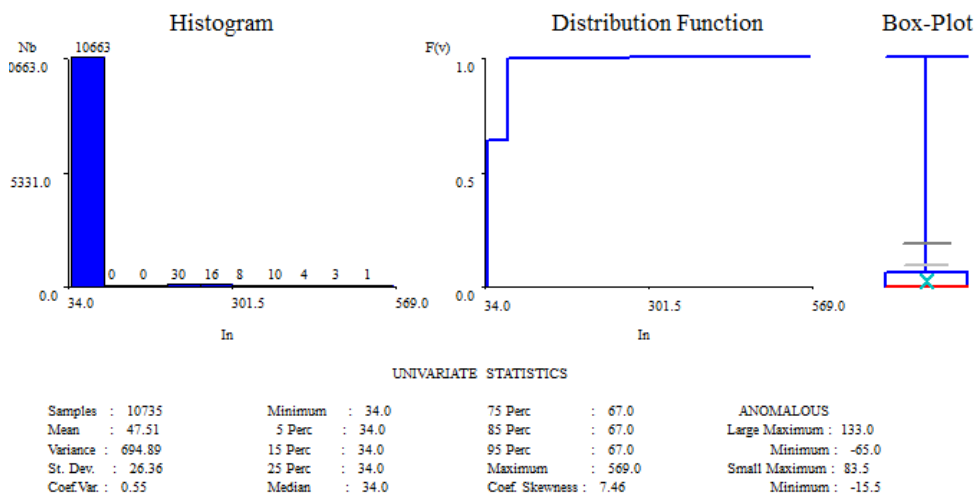


Figura II.14 - Análise univariada para o In.



### ANEXO III – Perfis

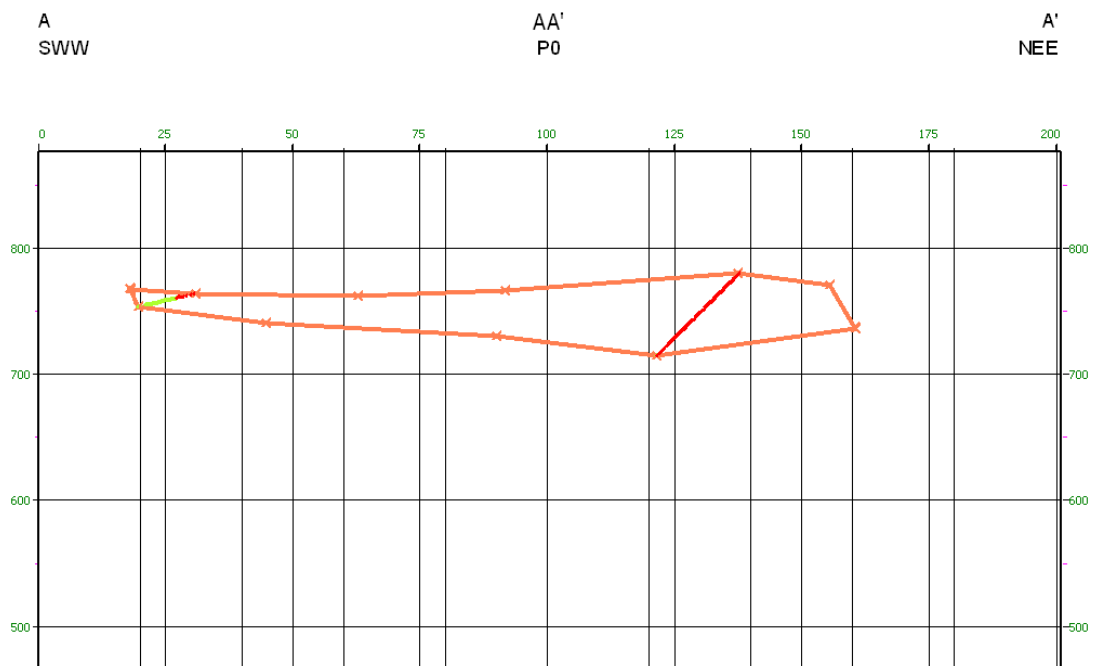


Figura III.1 - Perfil 1 com as sondagens na área de influência e a delimitação para a região I (laranja).

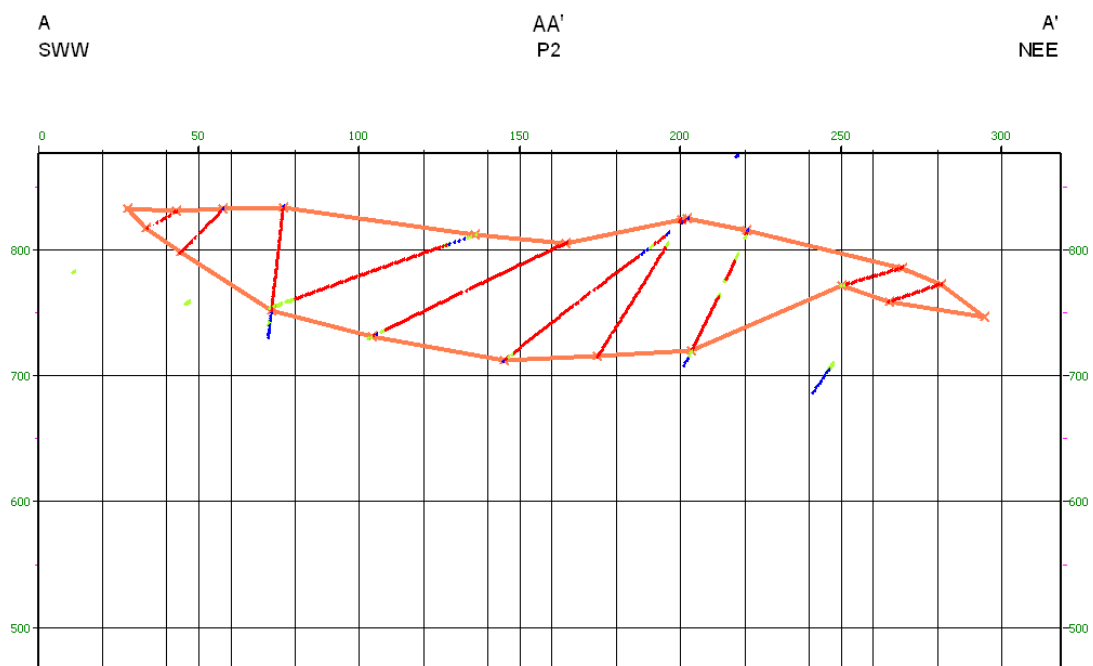


Figura III.2 - Perfil 2 com as sondagens na área de influência e a delimitação para a região I (laranja).

ANEXO III

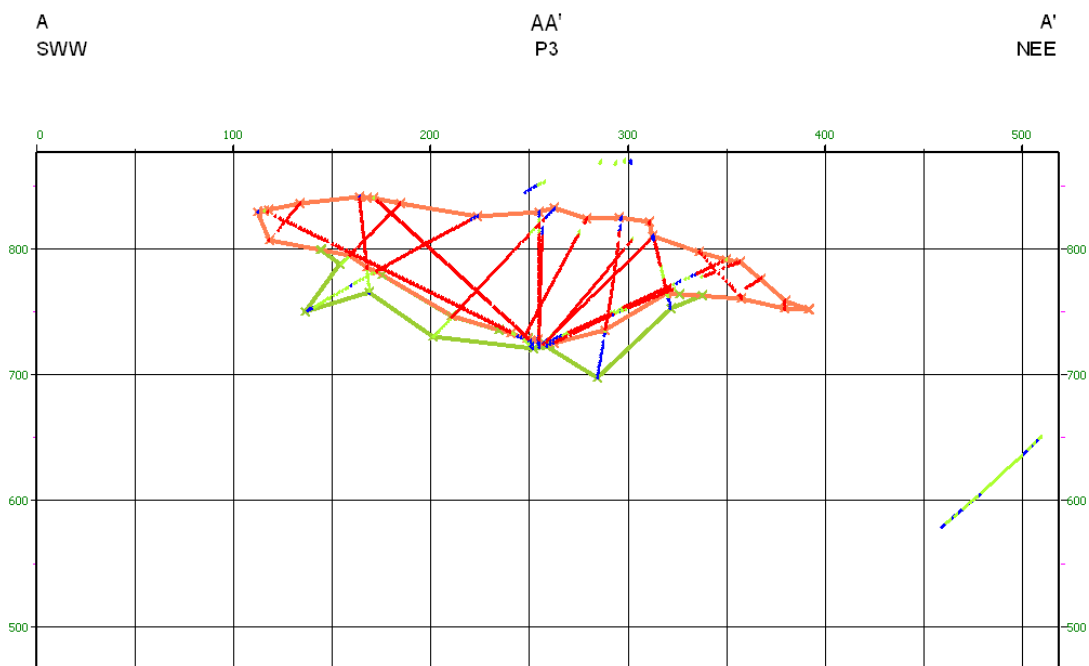


Figura III.3 - Perfil 3 com as sondagens na área de influência e a delimitação para a região I (laranja) e II (verde).

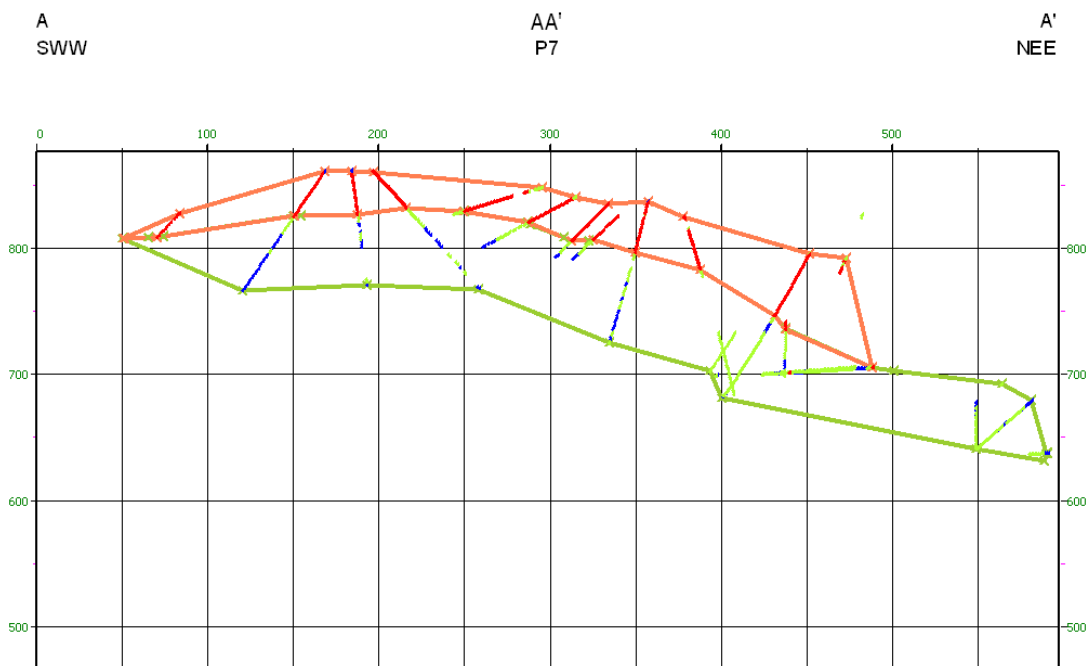


Figura III.4 - Perfil 7 com as sondagens na área de influência e a delimitação para a região I (laranja) e II (verde).

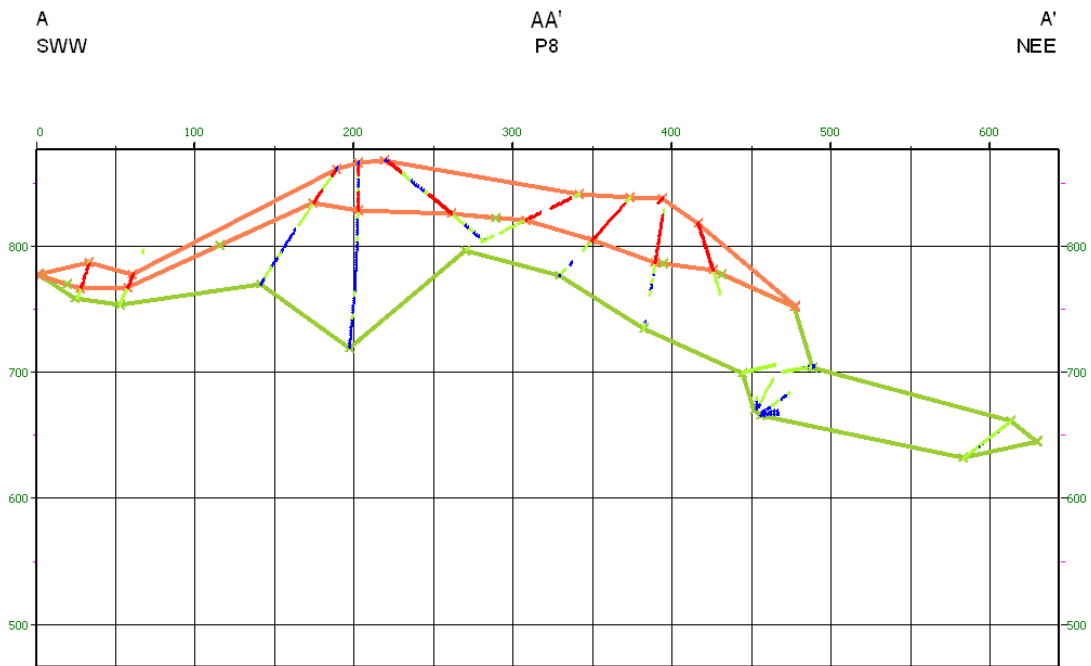


Figura III.5 - Perfil 8 com as sondagens na área de influência e a delimitação para a região I (laranja) e II (verde).

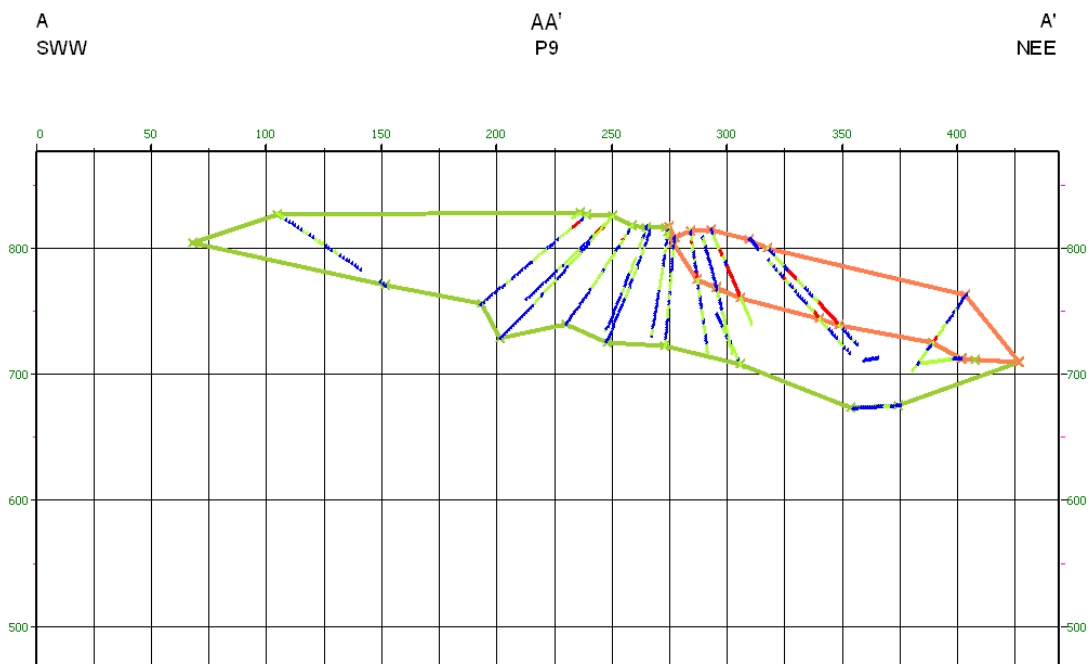


Figura III.6 - Perfil 9 com as sondagens na área de influência e a delimitação para a região I (laranja) e II (verde).

ANEXO III

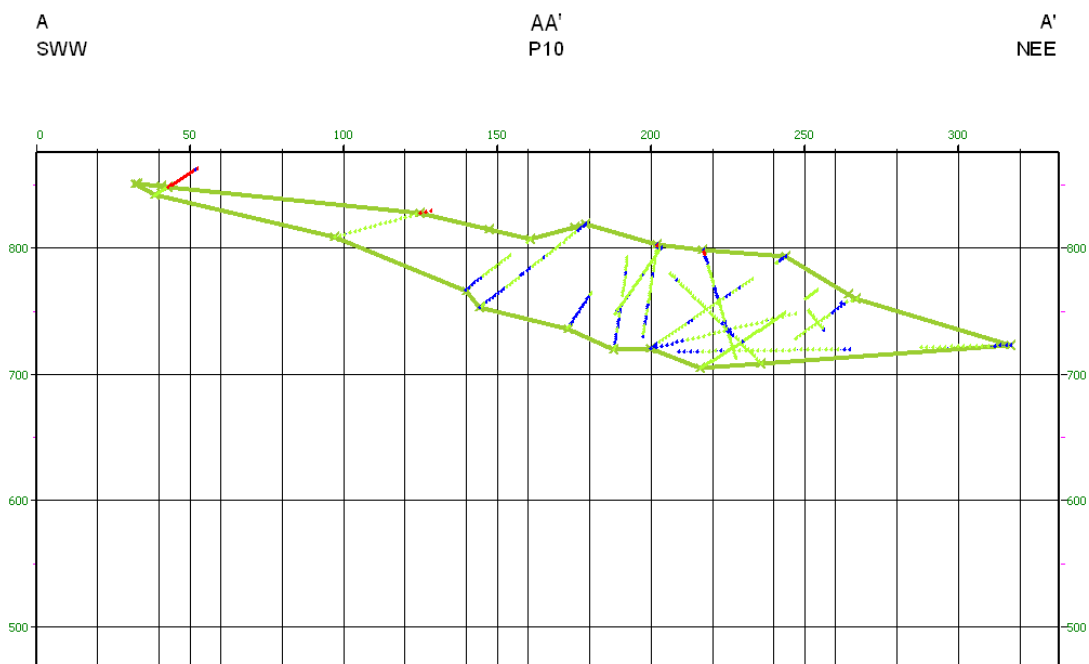


Figura III.7 - Perfil 10 com as sondagens na área de influência e a delimitação para a região II (verde).

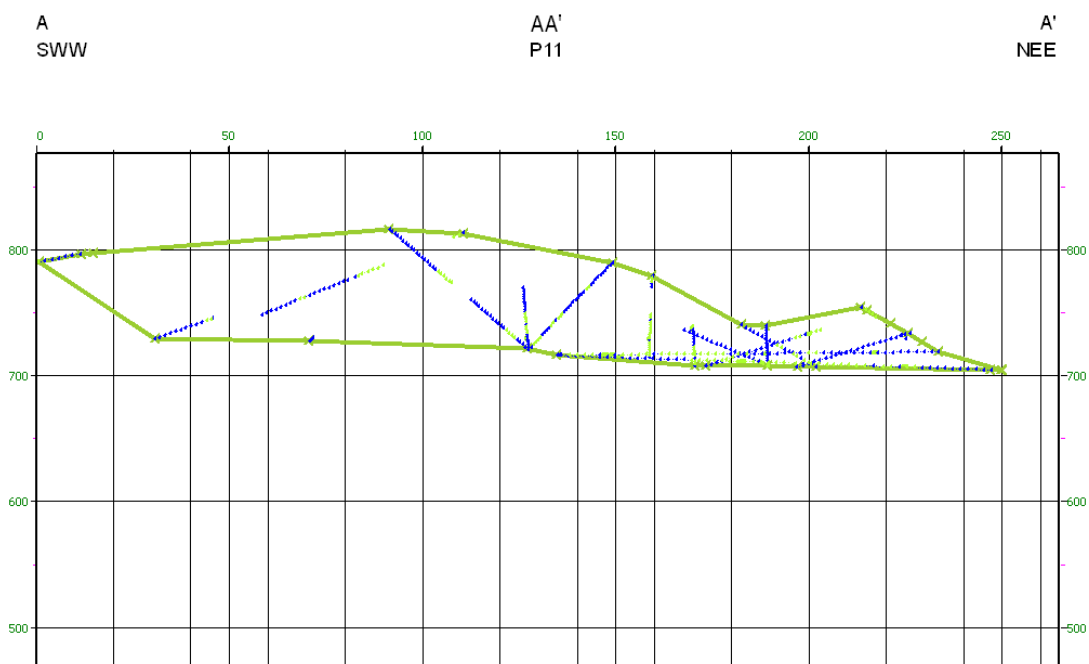


Figura III.8 - Perfil 11 com as sondagens na área de influência e a delimitação para a região II (verde).

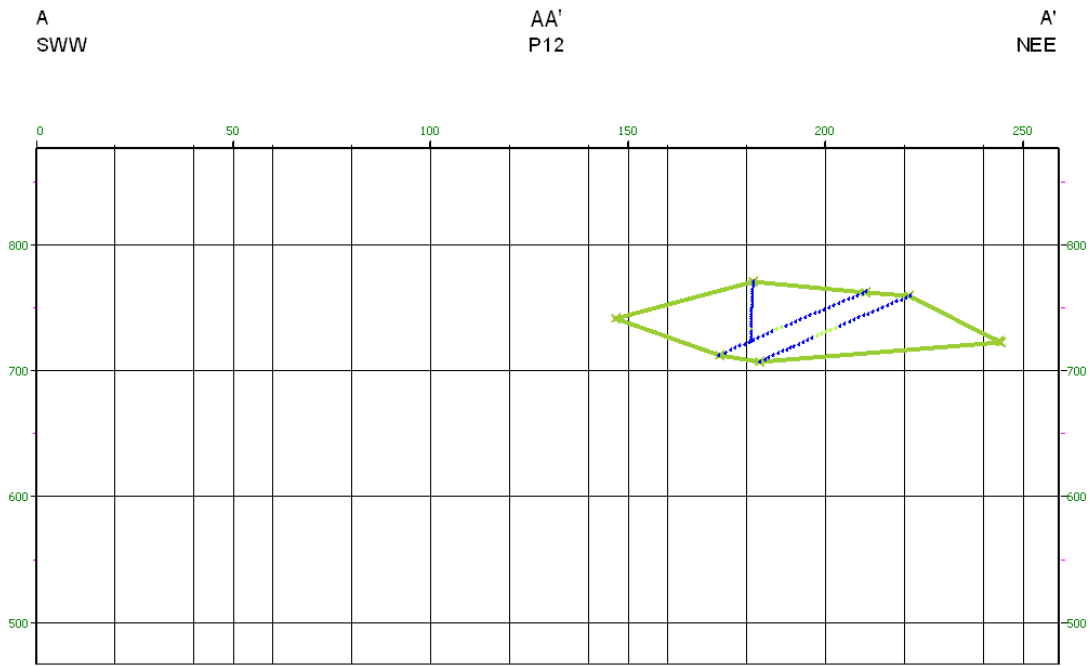


Figura III.9 - Perfil 12 com as sondagens na área de influência e a delimitação para a região II (verde).