



TÉCNICO
LISBOA

**Avaliação dos Recursos Mineiros do Sector NW do Jazigo
de Lagoa Salgada - Um Contributo da Simulação
Geoestatística**

Rita Vivas Elpídio de Amorim Folha

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Geológica e de Minas

Orientadores: Professor Doutor António Jorge Gonçalves de Sousa
Doutor Carlos José Paulino Rosa

Júri

Presidente: Professora Doutora Maria Teresa da Cruz Carvalho
Orientador: Professor Doutor António Jorge Gonçalves de Sousa
Vogal: Professor Doutor José António de Almeida

Junho 2016

Agradecimentos

Em primeiro lugar quero agradecer ao Engenheiro Carlos Caxaria, presidente da EDM-Empresa de Desenvolvimento Mineiro, por me ter permitido o acesso aos dados e possibilitado o desenvolvimento da unidade de estágio curricular e desta dissertação sobre o sector noroeste do depósito da Lagoa Salgada, na Faixa Piritosa Ibérica.

Ao Engenheiro João Barros, em nome da REDCORP, sem o consentimento do qual não teria sido possível este trabalho.

Quero agradecer aos orientadores deste trabalho, Professor Doutor António Jorge de Sousa e Doutor Carlos Rosa, pela disponibilidade, exigência, sugestões, questões, correções e interesse neste trabalho, acompanhamento e encorajamento constante.

Gostaria de agradecer à Professora Maria Teresa Carvalho que fez o primeiro contacto com a EDM, ainda no âmbito da unidade curricular de estágio profissional.

Quero agradecer em especial ao Professor Doutor Carlos Dinis da Gama, Professora Doutora Matilde Costa e Silva, Professora Doutora Paula Neves, Professora Doutora Amélia Dionísio, Professora Doutora Orquídia Neves e a todos os professores e trabalhadores da secção de Engenharia de Minas e Georrecursos do Instituto Superior Técnico.

A todos os amigos e colegas do IST, particularmente, ao Ruben Nunes pelos códigos de simulação sequencial direta por zonas.

A todos os amigos e colegas da EDM, em especial à Marisa Gomes pelo trabalho, imagens, uso do *Geosoft Target* e constante disponibilidade.

A todos os meus amigos e colegas do Mestrado em Engenharia Geológica e de Minas, em particular, ao José Carlos Pereira, à Mariana Miranda, ao Bruno Domingos e à Filipa Figueiredo.

A todos os meus amigos, em especial à Sara Ferreira, Sónia Vila, Toby Dawborn, pelo encorajamento.

À minha família, pais Teresa e Vasco, Tiago, Maria e Leonor.

Resumo

Na avaliação de um recurso mineral é necessária uma estimativa de recursos e reservas. Uma problemática atual da classificação de recursos é a crescente integração do conceito de quantificação de incerteza.

O presente trabalho foi desenvolvido em colaboração com a EDM – Empresa de Desenvolvimento Mineiro, com dados cedidos pela REDCORP. Teve como principal objetivo a classificação de recursos do sector noroeste do jazigo da Lagoa Salgada, na Faixa Piritosa Ibérica, consoante a incerteza quantificada. O valor de incerteza obtido por simulação sequencial direta por zonas foi quantificado pelo intervalo interquartil relativo.

O sector noroeste do jazigo da Lagoa Salgada, com 5.2Mm^3 , foi modelado e subdividido em mineralização de *gossan*, maciço e *stockwork*, e apresentava dados de 1326 amostras.

Usou-se um valor de 35% de incerteza na separação de recursos indicados/inferidos. Para um teor de corte de 2% de zinco, o recurso indicado foi calculado em 2.056Mt com teor médio de zinco de 2.63% e 63,509t de quantidade de metal de zinco, e o recurso inferido 1.49Mt com 3.97% zinco e 49,812t, respetivamente.

No recurso de cobre, usou-se um teor de corte de cobre de 1%, sendo o recurso indicado de 318,915t, com teor médio de 1.46% e quantidade de metal de 4,508t. Os recursos inferidos são de 54,720t, com teor médio de 1.46% e quantidade de metal de cobre de 798t.

Considera-se que a realização de mais sondagens diminuiria o grau de incerteza permitindo uma avaliação com maior nível de confiança, principalmente em profundidade. Mais estudos de incerteza podem ser efetuados nos outros elementos analisados.

Palavras-chave: Avaliação de recursos, simulação sequencial direta por zonas, quantificação de incerteza, sector noroeste do jazigo de Lagoa Salgada, Faixa Piritosa Ibérica.

Abstract

In the evaluation process of a mineral resource it is needed a resources/ reserves estimation process. One of the main issues is the integration of the concept of uncertainty quantification.

This work was performed in collaboration with EDM – Empresa de Desenvolvimento Mineiro, with data provided by REDCORP. The main aim of this work was resources classification according to the uncertainty degree in the north-west sector of Lagoa Salgada ore deposit, Iberian Pyrite Belt.

Uncertainty value was obtained by variability study around the mean value, assed by direct sequential simulation with domains.

Lagoa Salgada north-west deposit with 5.2Mm³ has mineralization types of *gossan*, massive sulphides and *stockwork*; and with 1326 samples.

An uncertainty value of 35% was used to split indicated/inferred resources. For a 2% zinc cut-off, the indicated resource has 2.056Mt with an average grade of zinc of 2.63% and 63,509t of metal quantity, being the inferred resource of 1.49Mt with 3.97% zinc and 49,812t.

For the copper resource, the used cut-off grade was 1%, with indicated resources of 318,915t with an average grade of 1.46% and metal quantity of 4,508t of copper. Inferred resources have 54,720t, with an average grade of 1.46% and metal quantity of copper of 798t.

Simulation results are underestimated comparing to Krigging. Being proposed a correction, has future works, for the adjustment of these two methodologies. More uncertainty studies should be performed with the other assayed elements, with this and other geoestatiscal methods.

Key_words: Resources evaluation, direct sequential simulation with domains, uncertainty quantification, north-west sector of Lagoa Salgada ore deposit, Iberian Pyrite Belt.

Índice

Resumo	iv
Abstract.....	vi
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento do tema	1
1.2 Objetivo.....	5
1.3 Organização da dissertação	6
2 Estado da Arte	7
2.1 Classificação de recursos e reservas.....	7
2.2 Métodos de cálculo de recursos.....	13
2.3 Geoestatística.....	17
2.3.1 Estimação por Krigagem	21
2.3.2 Simulação condicional – Simulação sequencial direta	21
2.4 Enquadramento da área da Lagoa Salgada	26
2.4.1 Enquadramento geográfico	26
2.4.2 Área de concessão de prospeção e pesquisa da Lagoa Salgada	26
2.4.3 Enquadramento geológico regional – Faixa Piritosa Ibérica.....	28
2.4.4 Enquadramento geológico local - Depósito da Lagoa Salgada	32
2.4.5 Mineralização – Depósito da Lagoa Salgada.....	34
3 Metodologia	37
4 Resultados e Discussão	40
4.1 Análise crítica da informação existente e seleção das variáveis a estudar	40
4.1.1 Suporte das amostras	44
4.1.2 Análise univariada da variável zinco	46
4.1.3 Análise univariada da variável cobre.....	49
4.1.4 Correlação entre as variáveis zinco e cobre	50
4.2 Definição geométrica do modelo de blocos	50
4.3 Modelação da dispersão espacial das variáveis selecionadas	52
4.3.1 Variografia da variável zinco	53
4.3.2 Variografia da variável cobre.....	55
4.4 Estimação dos teores esperados em cada bloco unitário.....	57
4.4.1 Estimação da variável zinco	57
4.4.2 Estimação da variável cobre	59

4.5	Simulação geoestatística da distribuição dos teores em cada bloco unitário	60
4.5.1	Simulação da variável zinco	61
4.5.2	Simulação da variável cobre	62
4.6	Estimação dos recursos geológicos parametrizados em função de um teor de corte	63
4.6.1	Funções de recuperação do zinco	63
4.6.2	Funções de recuperação do cobre.....	68
4.6.3	Classificação de recursos com base na incerteza	72
5	Conclusões e Trabalho Futuro.....	75
5.1	Conclusões Gerais	75
5.2	Trabalho Futuro	77
	Referências Bibliográficas	78
	Anexos.....	81

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Principais províncias de sulfuretos maciços vulcanogénicos do mundo incluindo a Faixa Piritosa Ibérica (Oliveira et al., 2013).	4
Tabela 2 – Informação relativa às campanhas de sondagens.	28
Tabela 3 – Recursos Indicados para o depósito da Lagoa Salgada	36
Tabela 4 – Recursos Inferidos para o depósito da Lagoa Salgada	36
Tabela 5 – Suporte das amostras para o <i>gossan</i> , maciço, <i>stockwork</i> , e total.	45
Tabela 6 - Estatísticos básicos do teor em zinco, para as zonas mineralizadas: <i>gossan</i> , maciço e <i>stockwork</i>	47
Tabela 7 - Estatísticos básicos do teor em cobre, para as zonas mineralizadas: <i>gossan</i> , maciço e <i>stockwork</i>	49
Tabela 8 – Verificação de diferença de volumes entre modelo geológico e modelo de blocos.	51
Tabela 9 – Tonelagem (t), teor médio (%) e quantidade de metal (t) de zinco, consoante o teor (%) de corte.....	59

Lista de Figuras

Figura 1 – Produção mundial de zinco em 2010 (Fonte: www.eea.europa.eu).	2
Figura 2 – Produção mundial de cobre em 2010 (Fonte: www.eea.europa.eu).	3
Figura 3 - Classificação de recursos e de reservas (modificado de: NI 43-101).	9
Figura 4 – Conversão de um recurso mineral em reserva mineral: abordagem tradicional vs abordagem orientada para incerteza e risco. Fonte: (adaptado de Godoy et Dimitrakopoulos, 2011). 11	
Figura 5 – Classificação de recurso com base na incerteza (Rossi et Deutsch, 2014).	12
Figura 6 – Métodos clássicos (adaptado de Sinclair et Blackwell, 2006).	13
Figura 7 – Método dos polígonos (a) e do vizinho mais próximo (b) (Sinclair et Blackwell, 2006).	15
Figura 8 – Método do inverso de uma potência de distância (Sinclair et Blackwell, 2006).	16
Figura 9 - Metodologia de estudo do variograma experimental (GeoMS1 e www.dpi.inpe.br/Camargo).	19
Figura 10 - Modelos teóricos de ajuste ao variograma (www.dpi.inpe.br/Camargo)	19
Figura 11 – Estrutura imbricada constituída por dois modelos esféricos e um de pepita (www.dpi.inpe.br/Camargo).	20
Figura 12 – Comparação entre métodos de estimação e de simulação (Rossi et Deutsch, 2014).	24
Figura 13 – Aferição de incerteza pelos métodos de simulação (Rossi et Deutsch, 2014).	25
Figura 14 – Enquadramento Geográfico da área de prospeção e pesquisa da Lagoa Salgada. Limites da mesma, e localização do depósito da Lagoa Salgada e do alvo de Rio-de-Moinhos.	26
Figura 15 - Mapa Geológico esquemático da Zona Sul Portuguesa em Portugal (Oliveira et al., 2013, adapt. Oliveira, 1990, Barriga et al., 1997, V. Oliveira et al., 1998b, 2001, Carvalho et al., 1999, Leistel et al., Rosa et al., 2001, Matos et al., 2000, 2003a).	28
Figura 16 - Coluna estratigráfica geral, Faixa Piritosa Ibérica (modificado de Tornos et al., 2006).	29
Figura 17 - Colunas estratigráficas sintéticas mais representativas da Faixa Piritosa, com separação entre Ramo Sul e Ramo Norte (Oliveira et al., 2013).	31
Figura 18 - Enquadramento geológico regional do depósito da Lagoa Salgada, NW da Faixa Piritosa Ibérica. Depósitos de sulfuretos Maciços: 1 = Lagoa Salgada, 2 = Caveira, 3 = Lousal, 4 = Aljustrel, 5 = Montinho, 6 = Salgadinho, 7 = Neves Corvo (adaptado de Oliveira et al., 2011).	33
Figura 19 – Resumo da sequência paragenética da Lagoa Salgada (Oliveira et al., 2011).	34
Figura 20 – Características da mineralização da Lagoa Salgada. A – Pirite e Esfalerite colofórmica (LS1). B – Esfalerite dentro de pirite maciça, com várias inclusões de calcopirite (com doença de	

calcopirite – CCP), com covelite e tetraedrite (LS4). C – Arsenopirite com tetraedrite e calcopirite (LS4). D – Tetraedrite e esfalerite intersticiais e pirite recristalizada (LS1) (Oliveira et al., 2011).	34
Figura 21 - Modelação geológica 3D da mineralização do sector noroeste da Lagoa Salgada, com topografia e sondagens, vista de sul (Folha, 2015).	35
Figura 22 – Metodologia utilizada.	37
Figura 23 - Representação esquemática das massas geológicas e identificação das zonas mineralizadas – <i>gossan</i> , maciço e <i>stockwork</i>	41
Figura 24 - <i>Gossan</i> e maciço, W e E, vista de este (a). Massas de <i>stockwork</i> , vista de sul (b)) (<i>Software:Target</i>) (Folha, 2015).	42
Figura 25 – Relação entre limites de mineralização e teores de zinco e cobre nas sondagens PX04A e PX03.	43
Figura 26 – Histogramas do suporte dos dados originais, totais e subdivididos em <i>gossan</i> , maciço e <i>stockwork</i>	45
Figura 27 – Distribuição espacial das amostras e seu comprimento (m).	46
Figura 28 - Distribuição tridimensional dos teores de zinco (%) (GeoMS1).	46
Figura 29 - Histogramas de teor de zinco das amostras. Total, <i>gossan</i> , maciço, <i>stockwork</i>	47
Figura 30 - Distribuição do teor de zinco consoante a massa geológica, separação de populações superior e inferior a 5%.	48
Figura 31 – Projecção 3D de teor de zinco (%) em todas as amostras, com valor de separação das 2 populações de 5%.	48
Figura 32 - Histograma da variável cobre, total, <i>gossan</i> , maciço, <i>stockwork</i>	49
Figura 33 – Projecção tridimensional de teor de cobre (%) em todas as amostras.	50
Figura 34 – Correlação entre o teor (%) de zinco e de cobre.	50
Figura 35 – Zonas, vista de este (SGems).	51
Figura 36 - Variogramas experimentais de teor (%) de zinco, das amostras de <i>gossan</i>	53
Figura 37 - Variogramas experimentais de teor (%) de zinco, das amostras de maciço.	53
Figura 38 - Variogramas experimentais de teor (%) de zinco, das amostras de <i>stockwork</i>	54
Figura 39 - Variograma experimental de teor (%) de cobre, das amostras de <i>gossan</i>	55
Figura 40 - Variograma experimental de teor (%) de cobre, das amostras de maciço.	55
Figura 41 - Variograma experimental de teor (%) de cobre, das amostras de <i>stockwork</i>	56
Figura 42 – Resultados da Krigagem normal e teores de zinco das amostras, vista em planta (XOY) (GeoMS1).	57

Figura 43 – Histogramas e estatísticos referentes à Krigagem normal no zinco. Total, <i>gossan</i> , maciço, <i>stockwork</i>	58
Figura 44 - Resultados da Krigagem normal e teores de cobre das amostras, vista em planta (XOY) (GeoMS1).....	59
Figura 45 - Histogramas e estatísticos referentes à Krigagem normal no cobre. Total, <i>gossan</i> , maciço, <i>stockwork</i>	60
Figura 46 – Simulação (40) valores de zinco.....	61
Figura 47 – Histogramas da média do teor (%) de zinco da média das simulações. Total, <i>gossan</i> , maciço e <i>stockwork</i>	61
Figura 48 - Histogramas da média do teor (%) de cobre da média das simulações. Total, <i>gossan</i> , maciço e <i>stockwork</i>	62
Figura 49 - Variação da tonelagem (t) de zinco com o teor de corte (%), no <i>gossan</i> . SSD_zonas e Krigagem.....	63
Figura 50 - Variação do teor médio (%) de zinco com o teor de corte (%), no <i>gossan</i> . SSD_zonas e Krigagem.....	64
Figura 51 - Variação da quantidade de metal de zinco com o teor de corte, <i>gossan</i> . SSD_zonas e Krigagem.....	64
Figura 52 - Variação da tonelagem (t) de zinco com o teor de corte (%), nos sulfuretos maciços. SSD_zonas e Krigagem.....	65
Figura 53 – Variação do teor médio (%) de zinco com o teor de corte (%), nos sulfuretos maciços. SSD_zonas e Krigagem.....	65
Figura 54 - Variação da quantidade de metal (t) de zinco com o teor de corte (%), nos sulfuretos maciços. SSD_zonas e Krigagem.....	65
Figura 55 - Variação da tonelagem (t) de zinco com o teor de corte (%), no <i>stockwork</i> . SSD_zonas e Krigagem.....	66
Figura 56 – Variação do teor médio (%) de zinco com o teor de corte (%), no <i>stockwork</i> . SSD_zonas e Krigagem.....	66
Figura 57 - Variação da quantidade de metal (t) de zinco com o teor de corte (%), no <i>stockwork</i> . SSD_zonas e Krigagem.....	67
Figura 58 – Separação dos blocos com teor de zinco simulado superior e inferior a 0.1% (Simulação nº 23).....	67
Figura 59 - Variação da tonelagem (t) de cobre com o teor de corte (%), no <i>gossan</i> . Resultado da SSD_zonas.....	68
Figura 60 - Variação do teor médio (%) de cobre com o teor de corte (%), no <i>gossan</i> . Resultado da SSD_zonas.....	69

Figura 61 - Variação da quantidade de metal (t) de cobre com o teor de corte (%), no <i>gossan</i> . Resultado da SSD_zonas.	69
Figura 62 - Variação da tonelagem (t) de cobre com o teor de corte (%), nos sulfuretos maciços. Resultado da SSD_zonas.	70
Figura 63 – Variação do teor médio (%) de cobre com o teor de corte (%), nos sulfuretos maciços. Resultado da SSD_zonas.	70
Figura 64 - Variação da quantidade de metal (t) de cobre com o teor de corte (%), nos sulfuretos maciços. Resultado da SSD_zonas.	70
Figura 65 - Variação da tonelagem (t) de cobre com o teor de corte (%), no <i>stockwork</i> . Resultado da SSD_zonas.	71
Figura 66 - Variação do teor médio (%) de cobre com o teor de corte (%), no <i>stockwork</i> . Resultado da SSD_zonas.	71
Figura 67 - Variação da quantidade de metal (t) de cobre com o teor de corte (%), no <i>stockwork</i> . Resultado da SSD_zonas.	71
Figura 68 – Separação de recursos com base na incerteza (25% e 35%).....	73
Figura 69 – Recurso indicado e inferido de zinco - 35% de incerteza (SGems).	73

Lista de Abreviações

Ag - Prata
Au - Ouro
Cu - Cobre
EDM – Empresa de Desenvolvimento Mineiro
FPI – Faixa Piritosa Ibérica
GOS – *Gossan*
GOSE – *Gossan este*
GOSW – *Gossan oeste*
IGM – Instituto Geológico e Mineiro
IST – Instituto Superior Técnico
JORC – Joint Ore Reserves Code
MSX – Maciço
MSXE – Maciço este
MSXW – Maciço oeste
NI 43-101 – National Instrument 43-101
Pb - Chumbo
REDCORP – Redcorp, Empreendimentos Mineiros
SFM – Serviço de Fomento Mineiro
Sn – Estanho
SME – Society for Mining, Metallurgy and Exploration
SMU – Selective Mining Unit
SSD_Zonas – Simulação Sequencial Direta por Zonas
STWK – *Stockwork*
STWKE – *Stockwork este*
STWKEb – *Stockwork este b*
STWKW – *Stockwork oeste*
U - Urânio
USGS – United States Geological Survey
VMS – Sulfuretos Maciços Polimetálicos
Zn - Zinco
%ZnEQ – Zinco Equivalente (percentagem)

1 Introdução

1.1 Enquadramento do tema

A exploração de recursos naturais minerais é uma atividade essencial ao funcionamento da sociedade, uma vez que proporciona o aporte de matérias-primas necessário ao desenvolvimento e ao progresso das civilizações.

Apesar dos avanços tecnológicos, reciclagem e uso de novos materiais, a necessidade de matérias-primas naturais, ditas convencionais continua a ser uma realidade, uma vez que os referidos avanços não suprimem as necessidades, uma vez que a procura das matérias-primas minerais continua a aumentar, sendo as suas reservas constantemente exploradas.

É necessário continuar a procurar, inventariar, descobrir e explorar novos recursos, e incidir em novas formas de abordagem da avaliação destes recursos. Outra característica nas explorações mineiras atuais é que se pretende atingir o potencial máximo do jazigo, otimizando a sua exploração. Neste contexto, um conhecimento do jazigo mais aprofundado e com maior confiança nas suas informações é determinante.

Os recursos minerais naturais são uma mais-valia económica para qualquer país ou região onde ocorram, sendo também importantes a nível geopolítico. Em particular, o sector dos minerais metálicos é de grande importância na União Europeia, na medida em que cria valor acrescentado a outros sectores de atividade, ao fornecer uma série de indústrias como a construção, automóvel, mecânica, eletrotécnica, aeroespacial e médica.

Em 2008, a União Europeia acordou uma política de entendimento comum sobre as matérias-primas, *Raw Materials Initiative*, onde assume como um problema fundamental a escassez deste tipo de materiais que sustentam pelo menos 30 milhões de empregos na União Europeia (Fonte: www.eea.europa.eu).

Em Portugal, os recursos geológicos contribuíram para as exportações com 833 M€ em 2014 (Fonte: www.dgeg.pt).

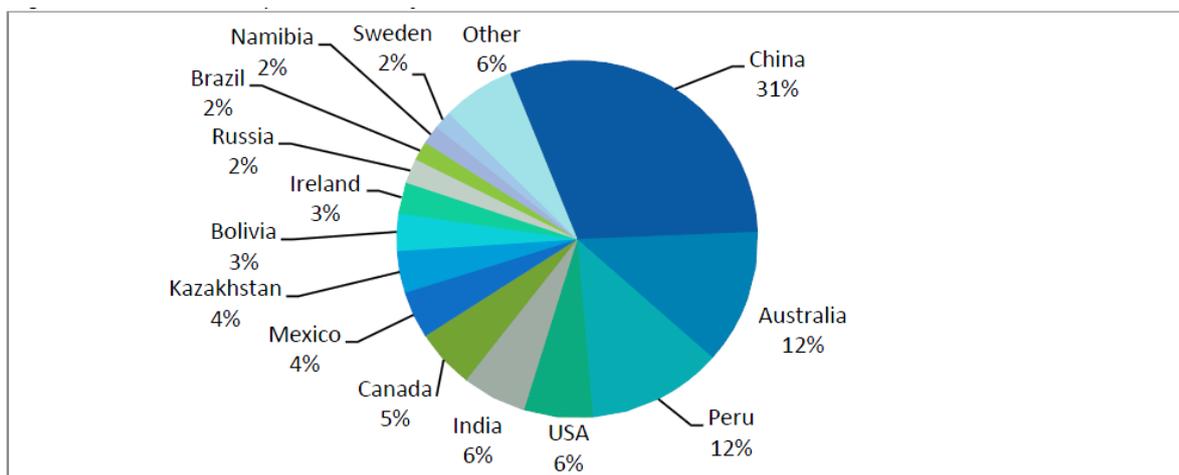
Indústria do zinco e do cobre

As reservas mundiais de metais são publicadas regularmente pelo *US Bureau of Mines*. O *World Bureau of Metal Statistics* reporta a produção e consumo dos dados para o alumínio, cádmio, cobre, chumbo, níquel, estanho e zinco. Na Europa a produção e o consumo de metais são publicados pela UNECE e pelo Eurostat (Fonte: www.etpsmr.org).

O *International Copper Study Group* (ICSG) é uma organização intergovernamental, com sede em Lisboa, que visa aumentar a transparência do mercado de cobre e promover debates internacionais e a cooperação sobre questões relacionadas com o cobre. O ICSG é o único fórum dedicado somente ao cobre, onde a indústria, suas associações e governos se podem reunir e discutir os problemas e objetivos comuns. O ICSG tem também abordado o estudo do Zinco.

Zinco

Os recursos globais de zinco são de 1.9 bilhões de toneladas. O zinco é o quarto metal mais transacionado do mundo. Em 2010, a China foi o maior produtor mundial de zinco, seguido pela Austrália e Peru. Apenas 7.5% do zinco produzido mundialmente foi produzido na União Europeia, tendo sido a Irlanda e a Suécia os países mais relevantes. A União Europeia importa zinco (Fonte: www.bgs.ac.uk, Brown, 2016).



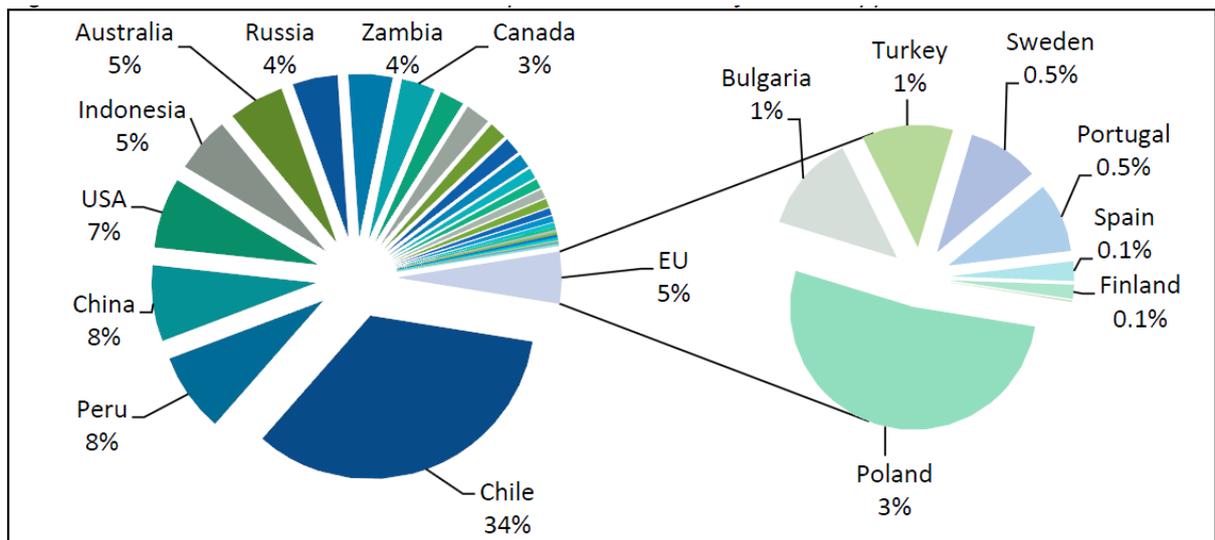
Source: US Geological Survey MY 2011

Figura 1 – Produção mundial de zinco em 2010 (Fonte: www.eea.europa.eu).

Cobre

A nível mundial foram produzidas 16 milhões de toneladas de cobre em 2010, segundo o USGS. O maior produtor de cobre em 2010 foi o Chile (34%), com 5,4 milhões de toneladas, seguido pelo Peru (8%), China (8%) e Estados Unidos da América (7%).

Nesse ano, a União Europeia produziu 814,277 toneladas, não tendo sido suficiente para suprir as suas necessidades. Portugal foi responsável pela produção de 74,300 toneladas, o equivalente a 0.5% da produção mundial, segundo o USGS (Fonte: www.bgs.ac.uk; Brown, 2016).



Source: USGS

Figura 2 – Produção mundial de cobre em 2010 (Fonte: www.eea.europa.eu).

Faixa Piritosa Ibérica – Depósito da Lagoa Salgada

Atualmente, os minérios de zinco e cobre são explorados em Portugal na Faixa Piritosa Ibérica, em depósitos de sulfuretos maciços vulcanogénicos polimetálicos, nas minas de Neves-Corvo e Aljustrel, sendo que nesta última só se explora cobre. Simultaneamente, ocorrem outros metais de alta tecnologia como índio e selénio, identificados por exemplo em Neves-Corvo e na Lagoa Salgada (Pinto et al., 2014; Oliveira et al., 2013).

A Faixa Piritosa Ibérica é “fonte de cerca de 65% do cobre, 69% do estanho, quase 30% do zinco, 8% do chumbo, 14% do ouro e 28% da prata produzidos na União Europeia” (Luís Costa, 1998, comunicação oral em Relvas, 2000).

Comparativamente com outras províncias metalogénicas a Faixa Piritosa Ibérica é uma das mais ricas, com elevado número de jazigos de grandes e médias dimensões, com tonelagens e teores elevados de zinco, cobre, chumbo, estanho, com prata e ouro, que estão expressos na tabela 1.

A tonelagem de sulfuretos polimetálicos acumulados ascende a 2500 milhões de toneladas (Mt), repartidos por 88 depósitos, dos quais cinco são considerados gigantes (>100Mt; La Zarza, Aznalcóllar, Sotiel-Migollas, Tharsis e Valverde) e três classificados como super-gigantes (>200 Mt; Rio Tinto, Neves-Corvo e Aljustrel; Tornos et al., 2006) (Oliveira et al., 2013).

Tabela 1 - Principais províncias de sulfuretos maciços vulcanogénicos do mundo incluindo a Faixa Piritosa Ibérica (Oliveira et al., 2013).

Província	Teores médios e conteúdos metálicos													
	Nº de depósitos	Depósitos gigantes (> 100 Mt)	Tonelagem total (Mt)	Tonelagem média (Mt)	Cu (%)	Cu (Mt)	Zn (%)	Zn (Mt)	Pb (%)	Pb (Mt)	Ag (ppm)	Ag (ton)	Au (ppm)	Au (ton)
Bacia de Hokuroku, Japão (Terciário)	20	0	94	4,7	2,07	1,9	4,44	4,2	1,14	1,1	91,9	8600,9	0,7	60,8
Cintura vulcânica do Mar Negro, Turquia (Cretácico superior)	5	0	98	19,5	1,56	1,5	1,20	1,2	0,06	0,1				
Faixa Piritosa Ibérica (Devónico-Carbónico)	88	7	1725	19,6	1,30	21,5	2,00	34,1	0,70	12,1	26,0	44707,0	0,5	898,0
Urais, Rússia (Silúrico-Devónico)	> 104	4	-1028	-10	1,64	16,9	1,09	11,2						
Buchans, Newfoundland, Canadá (Ordovícico-Silúrico)	5	0	17	3,4	1,34	0,2	14,62	2,5	7,60	1,3	104,6	1778,2	1,2	20,7
Bathurst, Canadá (Ordovícico)	29	1	252	8,7	0,56	1,4	5,43	13,7	2,17	5,5	62,0	15624,0	0,5	126,0
Cinturas vulcânicas Paleozóicas da Austrália Continental (Câmbrico-Pérmico) "Mount Read Volcanics", Tasmania, Austrália (Câmbrico-Ordovícico)	12	0	105	8,7	1,34	1,4	4,02	4,2	1,45	1,5	33,5	3516,2	2,9	308,4
Cintura Caledónica Norueguesa (Câmbrico-Ordovícico)	38	0	133	3,5	1,41	1,9	1,53	2,0	0,05	0,1				
Província de Skellefte, Suécia (Proterozóico)	52	0	161	3,1	0,70	1,1	3,00	4,8	0,40	0,6	47,0	7567,0	1,9	305,9
Província de Wisconsin, EUA (Proterozóico)	10	0	95	9,5	1,26	1,2	5,02	4,8	0,49	0,5	38,9	3695,5	1,1	104,5
Blocos de Yilgarn e Pilbara, Austrália Ocidental (Arcaico)	6	0	61	10,2	1,79	1,1	3,89	2,4	0,35	0,2	39,3	2394,9	0,6	39,0
Cintura de Abitibi, Canadá (Arcaico)	52	2	478	9,2	1,47	7,0	3,43	16,4	0,07	0,3	31,9	15261,0	0,8	382,7

Compilação de Relvas et al., 2002 e referências citadas

É neste enquadramento geológico regional que se encontra a área estudada, o jazigo da Lagoa Salgada, que atualmente se enquadra numa área de prospeção e pesquisa atribuída à REDCORP-Redcorp Empreendimentos Mineiros, Unipessoal, Ltda que desenvolve atividades de prospeção e pesquisa em parceria com a EDM - Empresa de Desenvolvimento Mineiro. Trata-se de um depósito mineral de sulfuretos maciços vulcanogénicos que se encontra sob 130m de sedimentos terciários. Apresenta várias massas conhecidas de três tipologias de mineralização, *gossan*, no topo, maciço no sector noroeste do jazigo e *stockwork*, na base e com distribuição mais abrangente que os anteriores.

Problemática

Numa tentativa de homogeneizar as informações associadas a projetos mineiros foram desenvolvidas várias normas internacionais: *American USGS Circular 831* (USGS, 1980) e *SME Guide* (SME, 1999), SAMREC CODE de África do Sul (SAMREC, 2000), *Canadian CIM Guidelines* (CIM, 2000) e a norma *National Instrument NI 43-101* (CSA, 2001), o código europeu (EURO, 2002) e o JORC CODE da Austrália (JORC, 2004), de acordo com Emery, et al 2006.

Estas normas aconselham a integração da incerteza nos cálculos de recursos e de reservas, ainda que sem carácter de obrigatoriedade.

A importância da caracterização da incerteza prende-se com a definição de níveis de confiança.

Tendo em consideração que para uma melhor avaliação de potencial e comparação entre projetos, o cálculo e classificação de recursos é imperioso, a quantificação da incerteza associada a cada jazigo ou sua área é uma informação relevante.

Pretendeu-se classificar os recursos existentes no sector noroeste do depósito da Lagoa Salgada recorrendo à quantificação da incerteza avaliada através do processo de simulação.

Recorreu-se à partição em modelos de blocos do sector noroeste do depósito da Lagoa Salgada tendo sido atribuído a cada bloco um valor de zona consoante o tipo de mineralização.

Utilizou-se a simulação sequencial direta que gera vários cenários equiprováveis das distribuições dos teores de zinco e cobre e que pressupõe a não transformação da variável inicial.

São, deste modo, atribuídos a cada bloco do modelo, vários valores, tendo em conta os dados analíticos das amostras e a continuidade espacial da variável. Esta variabilidade permite a quantificação, a modelação, e a ponderação da incerteza na classificação do recurso.

1.2 Objetivo

O objetivo deste trabalho consiste na elaboração de um cálculo de recursos classificados consoante a sua incerteza, para zinco e cobre, no sector noroeste do depósito da Lagoa Salgada, na Faixa Piritosa Ibérica. O depósito é constituído por mineralização do tipo *gossan*, maciço e *stockwork* que apresentam características distintas, tendo sido realizado o cálculo separadamente nestas três zonas.

Foi utilizado o método de simulação sequencial direta por zonas, que permite a regionalização dos tipos de mineralização, respeitando os dados das amostras e a continuidade espacial em cada zona. Este processo gera várias imagens equiprováveis que permitem aferir a incerteza através da variabilidade em cada bloco simulado.

Os resultados foram validados através da comparação dos valores obtidos por simulação sequencial direta por zonas, de tonelagens, teores médios e quantidade de metal, para o zinco e o cobre, com os obtidos por estimação, por Krigagem normal. A média das simulações deve ser semelhante ao valor obtido pelo processo de estimação.

Para a avaliação de recursos, foram testados vários teores de corte, sendo importante constatar que os valores relatados no último relatório de cálculo de recursos para Neves-Corvo, de 2013, foram de 3% zinco e 1% cobre.

Para a simulação sequencial direta por zonas utilizou-se um programa desenvolvido no CERENA por Ruben Nunes, de acordo com a metodologia proposta em Nunes et al, 2016, após Soares, 2001. A estatística univariada, bivariada e a variografia foram realizadas recorrendo ao *software* GeoMS1, desenvolvido no Instituto Superior Técnico, e ANDAD, e para a visualização tridimensional dos

resultados usou-se o *software* SGems – Stanford Geostatistical Modeling *Software*, que é de utilização livre.

1.3 Organização da dissertação

Esta dissertação está organizada da seguinte forma:

1 - Introdução: Pretende-se dar a conhecer o tema dos recursos minerais e demonstrar a sua relevância atual. Explica-se o enquadramento, o objetivo e dá-se a conhecer a disposição desta dissertação.

2 - Estado da Arte: Descreve-se o conhecimento atual desta problemática, nomeadamente sobre classificação de recursos e reservas, métodos de cálculo de recursos, geoestatística e o formalismo da simulação sequencial direta por zonas, que foi a técnica seguida neste trabalho. É ainda efetuado o enquadramento da área de estudo, o sector noroeste do jazigo da Lagoa Salgada, na faixa Piritosa Ibérica, dando-se a conhecer o seu enquadramento geográfico, geológico regional e local, e sinteticamente os trabalhos de sondagens já efetuados.

3 - Metodologia: Enuncia-se a metodologia seguida, uma abordagem geoestatística à problemática da classificação e cálculo de recursos, por simulação sequencial direta por zonas.

4 - Resultados e Discussão: Descrevem-se e analisam-se os resultados, através de uma análise crítica da informação com a escolha das variáveis a estudar, o zinco e o cobre. A partir do modelo geológico tridimensional e com a definição de parâmetros obtém-se o modelo de blocos. A dispersão espacial das variáveis é modelada e procede-se à estimação por Krigagem normal. São apresentados e analisados os resultados da simulação sequencial direta por zonas. Caracteriza-se a incerteza, baseada nas imagens simuladas, considerando a percentagem de intervalo interquartilico relativo como parâmetro de avaliação e classificação de recursos.

5 - Conclusões e Trabalho Futuro: Dão-se a conhecer as conclusões do trabalho desenvolvido e propõem-se trabalhos de continuação sobre esta problemática.

2 Estado da Arte

O investimento necessário à abertura de uma mina é da ordem de grandeza das dezenas a centenas de milhões de euros, pelo que, para minimizar o risco desse investimento, há que caracterizar e quantificar previamente, e com a maior precisão possível, os recursos existentes no subsolo determinando a quantidade e a qualidade de minério que pode ser extraído (Sinclair et Blackwell, 2006).

Um recurso é uma concentração natural de materiais sólidos, líquidos ou gasosos, que se encontra dentro ou sobre a Crosta Terrestre, de tal modo que a sua extração económica como *commodity* seja considerada viável, no momento atual ou num futuro próximo (www.usgs.gov). Um recurso é, portanto, uma ocorrência mineral *in situ* que está quantificada consoante os dados geológicos e em relação a um determinado teor de corte geológico. Este teor de corte corresponde ao teor abaixo do qual a exploração deixa de ser rentável, considerando o valor do metal contido num dado volume de rocha e um certo critério económico.

Os processos de avaliação, seleção e comparação de projetos mineiros requerem a definição de critérios de avaliação e de classificação de recursos e reservas minerais que são fundamentais.

A sistematização desta avaliação passa pelo uso de Normas reconhecidas internacionalmente que, para a avaliação de um jazigo mineral, incorporam a informação necessária ao cálculo de recursos e reservas e orientam e regem o processo de atribuição dessa classificação de recursos.

2.1 Classificação de recursos e reservas

A avaliação de recursos minerais baseia-se em estudos com o objetivo de aumentar o conhecimento dos seus volumes, teores, condições de explorabilidade e, ainda, determinar se a exploração desses recursos é economicamente viável. Neste processo, o cálculo e classificação de recursos e reservas é uma etapa fundamental.

A estimação de recursos e reservas, que normalmente é determinada a partir de séries de amostragens bi- ou tridimensionais, é aplicada a volumes de rocha mineralizada de muito maiores dimensões do que o volume amostrado, sendo que, os seus teores, localização e distribuição espaciais (recursos *in situ*) precisam de ser conhecidos com um grau de confiança aceitável (Sinclair et Blackwell, 2006).

A classificação de recursos pretende atribuir um nível de confiança reconhecido globalmente por todos os *stakeholders* envolvidos em projetos mineiros, desde pessoas, governos, empresas e instituições financeiras que investem nesses projetos.

Existem vários sistemas de classificações de recursos e de reservas que são aplicados por diferentes entidades, ou em diferentes regiões do mundo, sendo que a sua maioria tem as mesmas

características e objetivos. Estes sistemas são, por exemplo, a Norma Canadiana NI 43-101, *National Instrument 43-101*, preparado pelo *Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum*; PERC Code - *Pan-European Code for Reporting of Exploration Results, Mineral Resources and Reserves* preparado pelo *Pan-European Reserves and Resources Reporting Committee*; SAMREC Code - *South African Code for the Reporting of Exploration Results, Mineral Resources and Mineral Reserves* preparado pelo *South African Mineral Resource Committee*, ou a Norma Australiana JORC Code (*Joint Ore Reserves Code*) que é o “*Australasian Code for Reporting of Exploration Results, Mineral Resources and Ore Reserves*”.

Em todas estas normas existe a figura legal de “pessoa competente”, “*competente person*” (JORC, 2012) ou “*qualified person*” (NI 43-191, 2010) responsável pelo cálculo de recursos e reservas entre outros aspetos, como geologia, potencial de prospeção, processamento, considerações económicas, questões ambientais e sociais.

A divulgação pública de recursos e reservas estimados é feita, de acordo com certas regras do processo de categorização e classificação de recursos e requerer a sua classificação de acordo com o seu nível de conhecimento e confiança. Um recurso é classificado como inferido, indicado ou medido, e uma reserva como provável ou provada, conforme a natureza do recurso e a sua economicidade (Sinclair et Blackwell (2006), Rossi, et Deutsch, (2014)).

A classificação adotada neste trabalho corresponde à incorporada no *National Instrument 43-101 – Standards of Disclosure for Mineral Projects*, NI 43-101” (CIM, 2010).

“Um recurso mineral é uma ocorrência com concentração elevada de uma ou várias substâncias naturais; como materiais naturais sólidos inorgânicos ou orgânicos naturalmente fossilizados, que inclui metais base e preciosos, diamantes, carvão e minerais industriais; dentro ou sobre a Crosta Terrestre, de tal forma, quantidade e com um tal teor ou qualidade que apresente perspectivas razoáveis de extração económica.” (NI 43-101).

Os recursos minerais são estimados e interpretados tendo por base evidências geológicas específicas do recurso em causa, como: localização, quantidade, teor, características geológicas e nível de continuidade; e características derivadas de comparação com outros jazigos com a mesma natureza geológica.

O processo de classificação de recursos, de acordo com NI 43-101, JORC CODE e CRISCO, encontra-se descrito na figura 3:

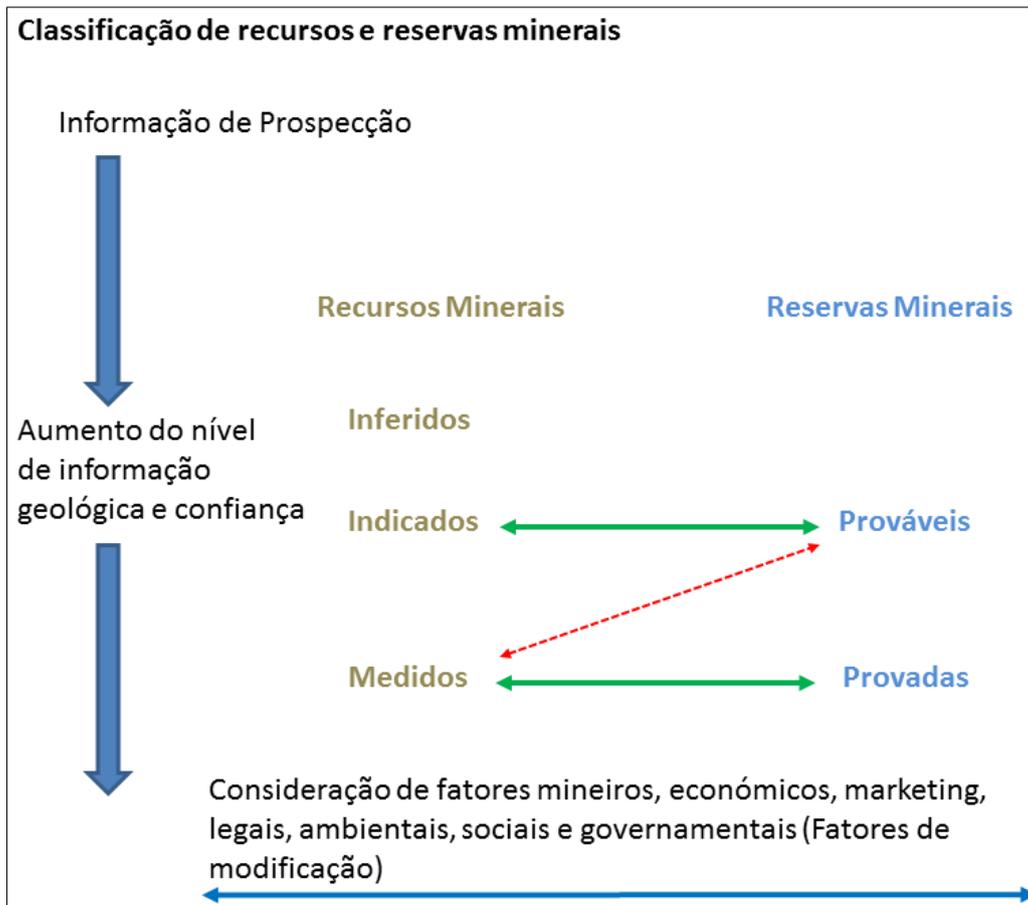


Figura 3 - Classificação de recursos e de reservas (modificado de: NI 43-101).

Um recurso mineral inferido, corresponde à parte do recurso mineral onde a quantidade e o teor ou qualidade podem ser estimados com base em evidências geológicas e amostragem limitadas e com um grau de continuidade geológica e de teor assumido mas não verificado.

A estimativa baseia-se na quantidade e qualidade de informação e amostragem limitadas previamente colhidas através de técnicas próprias de locais como afloramentos, trincheiras, poços, trabalhos e sondagens (NI 43-101).

Um recurso mineral indicado é a parte do recurso mineral da qual se conhecem a quantidade, teores ou qualidade, densidade, forma e características físicas com um nível de confiança suficiente que permita a aplicação de técnicas e parâmetros económicos que sustentem o planeamento mineiro e a avaliação da viabilidade económica do depósito. Esta informação baseia-se em informação detalhada e de confiança de prospeção e de teste recolhida através de técnicas apropriadas em afloramentos, trincheiras, poços, trabalhos e sondagens que estão espaçados suficientemente perto, de modo a que se possa assumir a continuidade da geologia e de teor (NI 43-101).

Um recurso mineral medido corresponde à zona do recurso mineral no qual o teor, quantidade, qualidade, densidade, forma e características físicas estão tão bem estabelecidas que podem ser

estimadas com confiança suficiente que permita a aplicação apropriada de parâmetros técnicos e económicos que suportem o planeamento de produção e a avaliação da viabilidade económica do depósito. Estas estimações são feitas com base em maior e melhor quantidade de informação do que o anterior, apresentando um espaçamento entre amostras mais apertado, que permita corroborar com maior certeza a continuidade geológica e de teor (NI 43-101).

Para uma parte de um determinado recurso passar a ter a classificação de reserva, é necessária a aplicação de “fatores de modificação” que englobam estudos de critérios tecnológicos e económicos, fatores governamentais e sociais, de mineração, de processamento, questões metalúrgicas, infraestruturas, ambientais, económicas, questões legais, de marketing (JORC, 2012).

Uma reserva mineral corresponde à porção economicamente viável de um recurso, indicado ou medido, tendo que ter sido aceite, pelo menos, um estudo de pré-viabilidade económica. Este inclui informação adequada de operações de exploração, processamento, metalurgia, estudos económicos, ambientais e outros relevantes que demonstrem que a exploração mineral é exequível (NI 43-101).

Uma reserva mineral provável corresponde à parte economicamente explorável de um recurso indicado e, nalguns casos, de um recurso medido demonstrado pelo menos num Estudo de Pré-viabilidade económica (NI 43-101).

A reserva mineral provada corresponde à parte economicamente explorável de um recurso medido, à data do Estudo de Pré-viabilidade económica (NI 43-101).

2.1.1 Classificação de um recurso ou reserva com base na quantificação da incerteza

O critério para a avaliação de confiança na classificação de recursos nestas normas é considerado crítico para o desenvolvimento de um projeto, pois é necessário conhecerem-se os recursos e as reservas suficientemente e com confiança necessária para serem considerados “ativos”.

Estes códigos, embora encorajem a quantificação da incerteza, não requerem a sua obrigatoriedade nem sugerem métodos específicos para este processo, obrigando apenas à aprovação da “*qualified person*”, sua experiência e capacidade de avaliar o projeto mineiro. Os maiores elementos que afetam o nível de confiança no cálculo de um recurso são o realismo do modelo geológico, a continuidade da mineralização, a configuração da malha de amostragem, a qualidade dos dados amostrados, e a fiabilidade e adequação do método de avaliação (Dohm, 2005).

A separação usada para definir recursos medidos, indicados e inferidos depende das práticas do “*qualified person*” e da empresa mineira. Muitas vezes apenas se compara o nível de precisão considerado durante os estudos de pré-viabilidade económica e estudos de viabilidade económica de outros estudos de engenharia e de estimação de custos. Segundo Rossi et Deutsch (2014) em 90%

das situações, o recurso medido é conhecido em $\pm 15\%$ de incerteza, um recurso indicado em $\pm 30\%$ de incerteza e um inferido entre 30% e 100% de incerteza. O recurso para lá do limiar de incerteza considerado, corresponde a mineralização potencial.

A classificação de um recurso pode ser baseada, de acordo com Rossi et Deutsch (2014) e Krzemién, et al (2016), nas seguintes abordagens:

- Distância entre sondagens: Através do número de amostras que entram em conta para a interpolação, a distância do centro do bloco à distância mais próxima. Uma variação deste sistema é aplicada usando a distância média, que pode ser facilmente modificada de modo a refletir eventuais anisotropias.
- Variâncias de Krigagem: Segundo Rossi et Deutsch (2014), a variância de Krigagem providencia uma medida da quantidade de informação aferida a cada bloco no momento da estimação. Blackwell (1998) demonstra um uso prático da variância de Krigagem para a classificação de um recurso através do desvio padrão de Krigagem relativo, de acordo com Sinclair et Blackwell, 2006.
- “Multi-pass Kriging plans”: Interpolações iterativas em várias fases com mudanças no número de amostras e no raio de procura do elipsoide de estimação.
- Modelos de incerteza: Um modelo de incerteza baseado na simulação geoestatística pode ser um bom guia para classificação de recursos, como se pode observar pela figura 4. São gerados vários cenários do recurso que são utilizados para a análise de risco do projeto mineiro, e que estão na base dos trabalhos seguintes que podem ser planeados com um intervalo de confiança determinado, contribuindo no dimensionamento e caracterização das várias fases de planeamento mineiro, processos mineiros, *design* e calendarização de processos, previsões financeiras e de produção.

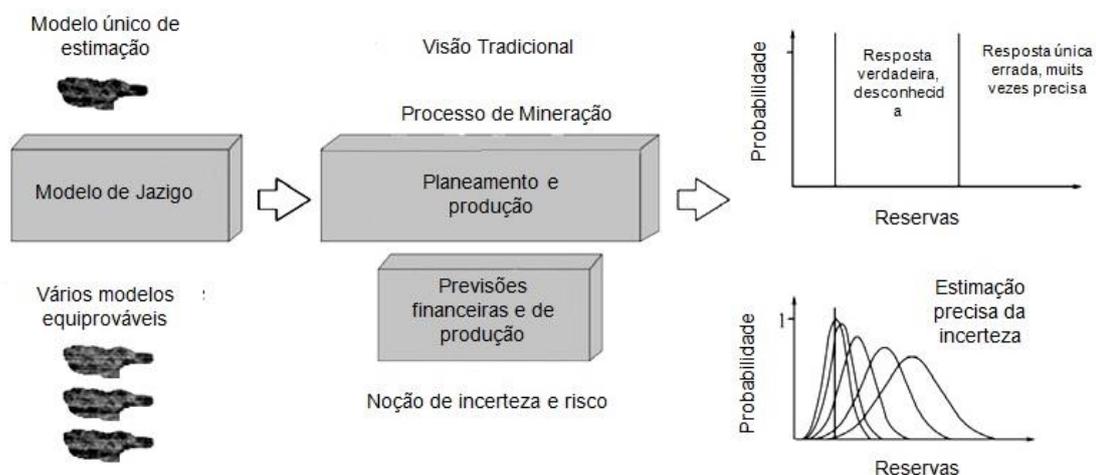


Figura 4 – Conversão de um recurso mineral em reserva mineral: abordagem tradicional vs abordagem orientada para incerteza e risco. Fonte: (adaptado de Godoy et Dimitrakopoulos, 2011).

Considerando a distância entre furos como guia à qualidade do processo de estimação Rossi et Deutsch (2014) consideram razoável interligar a densidade de informação proveniente de sondagens ao resultado final de estimação. Em todos os casos, os resultados de interpolação devem ser afetados pelo modelo litológico, para que possíveis erros de estimação sejam evitados, de modo a que não sejam estimados blocos onde no modelo geológico não ocorra mineralização.

Silva et Boirvert (2014), segundo Krzemién, et al (2016), analisaram 120 relatórios e demonstraram que 83% categorizaram os recursos usando a relação entre o número de amostras e a distância ao centro do bloco e 6% usaram a variância dada pelo processo de estimação.

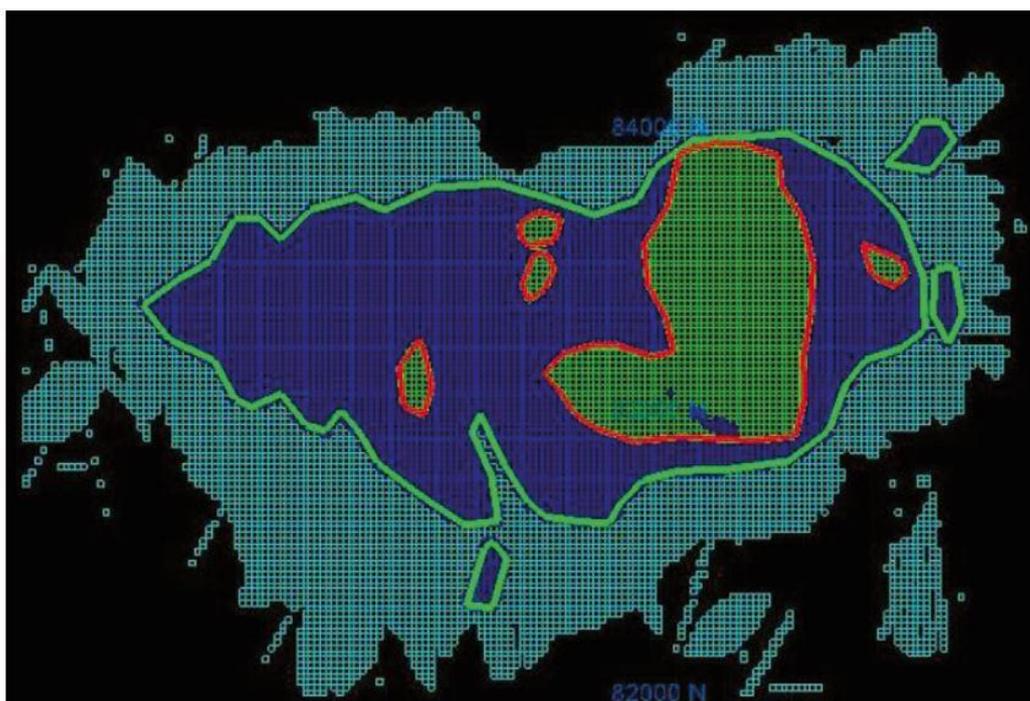


Figura 5 – Classificação de recurso com base na incerteza (Rossi et Deutsch, 2014).

As melhores práticas consistem na apresentação de um modelo de incerteza para além da existência do modelo estimado. Requerem a modelação da incerteza com toda a informação quantificável, incluindo a proveniente de dados, amostragens, procedimentos de amostragem, modelo geológico, simulação dos modelos definidos, modelação de teor. No entanto, uma modelação baseada apenas numa avaliação probabilística não é aconselhável pois pode atribuir volumes demasiado grandes ou pequenos.

A análise probabilística pode auxiliar a “*qualified person*” a redefinir critérios geométricos devendo-se sempre aplicar estes critérios, com ou sem a suavização dos contornos entre classificações de recursos, e promover uma análise probabilística de suporte a essa avaliação e classificação (Rossi et Deutsch, 2014).

2.2 Métodos de cálculo de recursos

“Resource/reserve estimates are just that – estimates” (Sinclair et Blackwell, 2006).

As classificações de recursos e reservas pressupõem a existência de metodologias de cálculo de recursos que pretendem reproduzir certas características da distribuição de teores dentro do volume considerado recurso que é modelado. Considera-se, portanto, que estamos sempre perante uma aproximação da realidade, tendo essas metodologias evoluído ao longo do tempo. A modelização de recursos depende da quantidade e qualidade de informação disponível - geológica, geoquímica, etc - mas também da metodologia considerada a mais adequada para cada tipo de jazigo, sendo que, os resultados têm de ser coerentes com o que se conhece do fenómeno (Soares, 2006). Existem vários métodos de modelização da distribuição de um teor dentro de um modelo geológico, podendo a seleção do melhor método basear-se em técnicas que aferem a qualidade do método escolhido, como validação cruzada (Isaaks et Srivastava, 1989), amostragem para verificação de teor (John et Thalenhorst, 1991), mineração experimental e considerações teóricas (Sinclair et Blackwell, 2006). Alguns destes métodos requerem a prévia partição do volume a estudar num modelo de blocos, que consiste na divisão do volume a estudar em vários blocos com determinada dimensão segundo os eixos X,Y,Z, que podem aproximar-se do “Selective Mining Unit” (SMU). Este consiste no menor volume de material que pode ser extraído seletivamente como minério ou estéril. A sua dimensão é subjetiva, baseando-se na experiência de mina, nos processos de calibração da produção e outras características das operações mineiras, como dimensão de equipamentos. (Rossi et Deutsch, 2014). Os métodos de cálculo de recursos podem dividir-se em duas categorias, segundo Darling (2011) e Sinclair et Blackwell (2006):

1- Métodos Clássicos:

Os métodos tradicionais de modelação de um recurso são os métodos geométricos, que são métodos empíricos dependentes da experiência de quem os usa. São os mais antigos e baseiam-se em delineações manuais em planta e/ou perfis verticais. São métodos deterministas que calculam o valor de um teor no espaço entre as amostras a partir de uma combinação linear dos valores medidos. Têm por base critérios geométricos para determinar a influência das amostras (Soares, 2006).

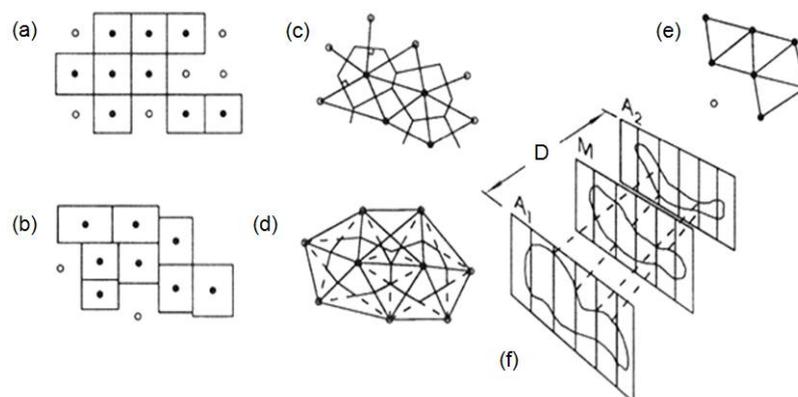


Figura 6 – Métodos clássicos (adaptado de Sinclair et Blackwell, 2006).

1.1 - Método das secções: longitudinal ou transversal

Este método, representado na figura 6 (f), é adequado ao caso de depósitos com geometria regular, com contactos bruscos ou ligeiramente graduais, e também a depósitos tabulares (veios e em camada estratiforme), investigados por sondagens que atravessam as secções. Normalmente, para ser aplicado, a informação de teores encontra-se concentrada e está disposta ao longo de secções equidistantes (*cross sections*) produzindo um padrão sistemático.

É feita uma interpretação geológica e uma interpretação da distribuição de teores em cada perfil ou planta, sendo estas interpretações projetadas até às que se encontram no perfil seguinte. Normalmente, considera-se a influência de um perfil até metade da distância ao próximo perfil. Este processo é feito para todo o corpo mineralizado e posteriormente calculado o recurso.

Uma das restrições deste método é a necessidade de alinhamento preferencial das sondagens segundo uma direção perpendicular aos perfis a desenhar e a possibilidade de sobre ou subestimação de teores nos volumes entre perfis (Revuelta et Jimeno, 1997).

As vantagens associadas à utilização deste método consistem na possibilidade de um grande controlo geológico sobre os teores, e a utilização das secções e plantas já delineadas pelas empresas mineiras, facilitando a incorporação geológica.

1.2 - Métodos dos polígonos e método do vizinho mais próximo

O método dos polígonos, representado na figura 6 (a, b, c, d), aplica-se a realidades com poucas amostras e dispostas irregularmente, que dificilmente sejam projetáveis numa secção.

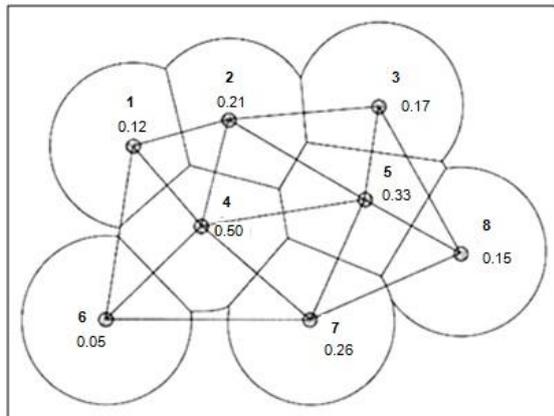
É desenhado um polígono à volta de cada amostra, com esta no seu centro. O teor de cada amostra é considerado constante até metade da distância a cada amostra contígua, deste modo, delimitam-se polígonos com as amostras no seu centro geométrico.

Formam-se assim polígonos de influência de cada amostra onde o teor da amostra é atribuído ao polígono por inteiro. A tonelagem, teor e quantidade de minério, contabilizados para o cálculo de recursos, são determinados com base na soma de todos os volumes dos polígonos ponderados com os teores das respetivas amostras (Sinclair, et Blackwell, 2006).

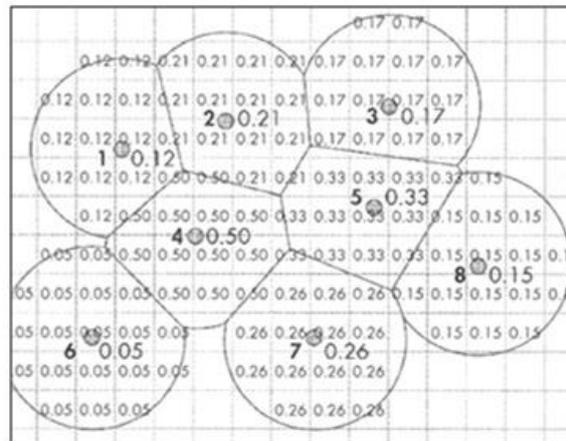
É um método de estimação por volumes, que tal como o método anterior, pode promover a sobre ou subavaliação de recursos. Para resolver esta problemática, Revuelta et Jimeno (1997) propõem, a definição de uma área de influência de cada polígono que consiste na delimitação de novos polígonos com limites concretos, para se poderem classificar as reservas mineiras incluídas numa zona específica.

O método equivalente ao dos polígonos, feito atualmente por computação, é o da estimação pelo vizinho mais próximo, observado na figura 7b). Este método requer o desenho de uma malha retangular de blocos sobre a zona das sondagens e, posteriormente, a atribuição ao bloco do valor da

amostra mais próxima. Se a dimensão do bloco não for superior em 25% ao espaçamento entre sondagens este método aproxima-se ao método dos polígonos.



Hole	Grade	Area
1	0.12	39.4
2	0.21	37.6
3	0.17	42.0
4	0.50	37.7
5	0.33	33.8
6	0.05	50.1
7	0.26	46.8
8	0.15	46.3
		Total Area = 333.7
		Total Area x Grade = 71.39
		Average Grade = 0.2139



Hole	Grade	No. Of Blocks
1	0.12	12
2	0.21	14
3	0.17	14
4	0.50	13
5	0.33	12
6	0.05	19
7	0.26	14
8	0.15	16
		Total Blocks = 114
		Sum Blocks x Grade = 24.21
		Average Grade = 0.2124

a)

b)

Figura 7 – Método dos polígonos (a) e do vizinho mais próximo (b) (Sinclair et Blackwell, 2006).

A vantagem deste método consiste na simplicidade de implementação sendo que também não está sujeito a enviesamento devido a interpretação. Produz uma estimaco do teor médio do depósito sem aplicao de teor de corte que pode ser usada como comparao e validao de outros métodos (Darling, 2011).

1.3 – Método dos triângulos

Este método, representado na figura 6 e), consiste numa abordagem triangular ao método poligonal e  aplicado desenhando-se um modelo de blocos irregular sobre um modelo geológico. Os prismas triangulares so definidos numa projeo bidimensional e traados unindo três amostras. Desde modo, as amostras localizam-se nos vrtices dos triângulos e contribuem na mesma proporo para o valor atribuído a cada um. O teor de cada bloco é portanto estimado independentemente do valor dos blocos adjacentes.

Quando comparado com o método dos polígonos é incorporada alguma suavização na estimação, representando-se melhor a cauda da distribuição de teores das amostras.

A problemática desta metodologia consiste na suavização dos teores ser empírica, na ponderação entre as três amostras ser igual, em não serem consideradas anisotropias e na geometria dos blocos não ser regular, pois os triângulos têm diversos formatos e dimensões variadas fruto da densidade das amostras (Sinclair et Blackwell, 2006).

1.4 - Método do Inverso da potência das distâncias ($1/d$, $1/d^n$)

O método do inverso da potência de distância baseia-se na evidência empírica de que o peso de cada amostra é proporcional ao inverso de uma potência da distância entre o local a estimar e a amostra.

É, como os anteriores, um método determinista, sendo um método que considera uma média ponderada dos pesos atribuídos a cada amostra, sendo esta atribuição de peso correspondente ao valor de uma potência da distância. A equação que define o peso, w_i , atribuído é:

$$w_i = \frac{d_i^{-p}}{\sum d_i^{-p}} \quad \text{Eq. 1}$$

Sendo d_i , a distância entre a amostra i e o local a estimar, e p , a potência atribuída.

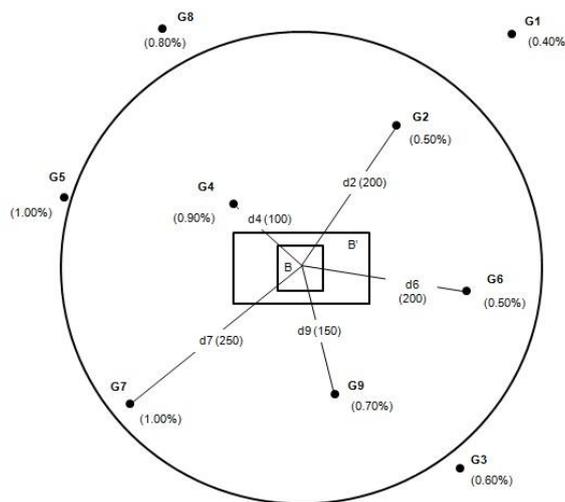


Figura 8 – Método do inverso de uma potência de distância (Sinclair et Blackwell, 2006).

Sinclair et Blackwell, 2006, exemplificam este método na figura 8, onde se observa que no centro do bloco, B, no qual se pretende estimar o teor, é definido um raio de busca, representado por um círculo. Quanto maior a potência atribuída, maior será o peso das amostras mais próximas ao centro do bloco.

As desvantagens deste método, quando comparado com o método do vizinho mais próximo, são a suavização dos teores, a não adaptação à forma do bloco (visto que o mesmo procedimento é feito para pontos estimados e para blocos (segundo Sinclair et Blackwell (2006)), a não “desagregação” de agrupamentos preferenciais de amostras.

Segundo Barnes (1980), se houver anisotropia nos teores é possível estabelecer uma elipse de procura, orientada de acordo com essa anisotropia (Catarino (2009)).

2- Métodos geoestatísticos:

Os métodos geoestatísticos nasceram da necessidade de incorporar e caracterizar dois conceitos que foram observados em fenómenos naturais de recursos minerais, o carácter misto dos dados, que apresentam estrutura mas também aleatoriedade.

Estes métodos providenciam uma medida quantificada de vários conceitos: zona de influência de uma amostra; influência da geometria dos dados na estimação, como agrupamento das amostras, o uso de dados com diferentes tipos de suporte.

Os métodos geoestatísticos (secção 2.3) baseiam-se na construção de um modelo de blocos onde são estimados ou simulados os valores das variáveis de interesse. Os modelos obtidos por Krigagem lidam mal com a incerteza associada, enquanto que os métodos de simulação estão especialmente vocacionados para a modelação dessa incerteza.

2.3 Geoestatística

“A etimologia do termo Geoestatística designa o estudo estatístico de um fenómeno natural”, segundo o seu autor, Matheron em 1962 (Journel & Huijbregts, 1993).

A maioria dos conjuntos de dados relacionados com ciências da Terra possui uma organização ou estrutura espacial, sendo que a distribuição dos teores de minério num depósito apresenta um carácter misto, sendo simultaneamente estruturado e aleatório.

A geoestatística nasceu da necessidade de incluir estes dois conceitos intrínsecos à avaliação de qualquer depósito mineral (Isaaks & Sristava, 1989; Durão, 2006).

O processo de mineralização apresenta uma estrutura global e segue princípios, geológicos e metalogenéticos, existindo sempre zonas com teores mais ricos e outras menos ricos, o que denota a existência um certo nível de continuidade. Contudo, apesar de ser maioritariamente organizada, a mineralização nunca é suficientemente regular de modo a não ser possível uma aproximação determinística (Journel & Huijbregts, 1993).

Deste modo, para a caracterização destes padrões de variabilidade espacial e para o seguinte processo de estimação recorrem-se a métodos geoestatísticos (Durão, 2006).

A teoria Geoestatística baseia-se na observação de que a variabilidade de uma variável regionalizada apresenta uma determinada estrutura. Um fenómeno de mineralização pode ser caracterizado pela distribuição espacial de um certo número de quantidades mensuráveis chamadas variáveis regionalizadas.

Os teores $z(x)$ e $z(x+h)$ de um metal nos pontos x e $x+h$ são auto-correlacionados; esta auto-correlação depende tanto do vector h (em módulo e direcção) como do tipo de mineralização considerada.

“Uma função aleatória $Z(x)$ pode ser vista como um conjunto de variáveis aleatórias $Z(x_i)$ definidas em cada ponto x_i do depósito $D = Z(x) = \{Z(x_i) \forall x_i \in D\}$. As variáveis aleatórias $Z(x_i)$ são correlacionadas e a sua correlação depende no vector h (em módulo e direcção) que separa dois pontos x_i e x_i+h e da natureza da variável considerada (o tipo de mineralização considerado). Em cada ponto x_i , o valor do teor da amostra $z(x_i)$ é interpretado como sendo uma realização particular de uma variável aleatória $Z(x_i)$ ” (Journel & Huijbregts, 1993).

A variabilidade entre as duas quantidades $z(x)$ e $z(x+h)$ relativas à localização dos pontos x e $x+h$, é medida por variografia. Esta é uma ferramenta geoestatística utilizada na quantificação da continuidade espacial de uma variável $Z(x)$, para a posterior inferência espacial dessa variável em toda a área de estudo, tanto por estimação como por simulação (Isaaks & Sristava, 1989; Goovaerts, 1997; Soares, 2006; Durão, 2006).

A ferramenta geoestatística utilizada neste trabalho para medir a continuidade espacial de $z(x)$ é o variograma $\gamma(h)$, que é uma medida de continuidade e homogeneidade estrutural do processo espacial, do qual, se conhece apenas um conjunto de dados (Soares, 2006).

O variograma teórico é definido como sendo a esperança matemática do quadrado da diferença entre os valores da variável nos pontos no espaço.

O variograma experimental é estimado a partir dos valores da variável das amostras, em função da distância (h) entre amostras e ao longo de várias direcções (θ), através da seguinte equação:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{\alpha=1}^{N(h)} [z(x_{\alpha}) - z(x_{\alpha} + h)]^2 \quad \text{Eq. 2}$$

Onde $N(h)$ é o número de pares de pontos, numa determinada direcção (θ), para a distância h ; $z(x_{\alpha})$ é o valor medido de uma propriedade num dado local e $z(x_{\alpha} + h)$ é o valor medido num local a uma distância h de $z(x_{\alpha})$.

Procuram-se as direções de maior continuidade e tenta-se determinar se existe algum tipo de anisotropia estrutural que represente a diferente continuidade do fenômeno nas várias direções, recorrendo-se à construção de variogramas experimentais em várias direções.

Evidenciam-se os seguintes parâmetros de construção de um variograma experimental na figura 9: azimute (θ) e inclinação (ϕ), R – tolerância em torno da direção escolhida, h - distância entre pontos, Lag – amplitude entre intervalos.

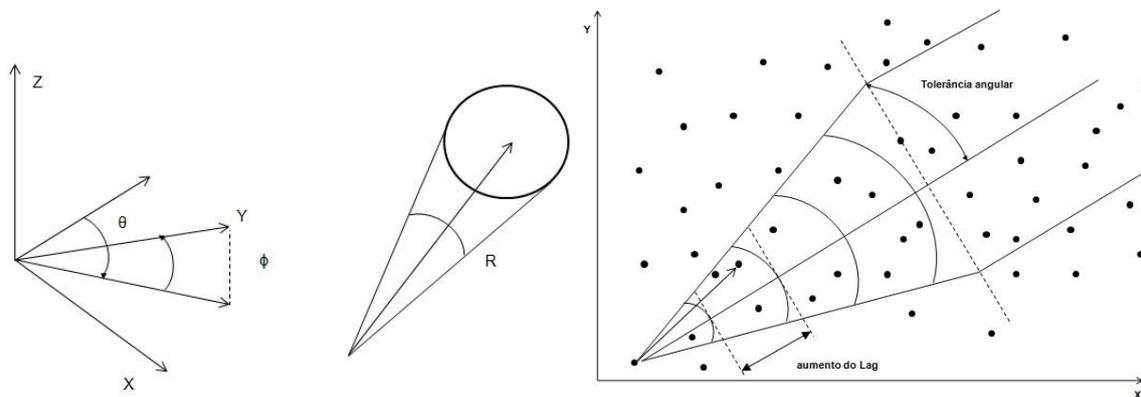


Figura 9 - Metodologia de estudo do variograma experimental (GeoMS1 e www.dpi.inpe.br/Camargo).

Deste modo, e recorrendo-se a *softwares*, neste caso aos módulos geoVar e geoMod do *software* GeoMS1, são determinados os variogramas experimentais para as direções consideradas principais e, posteriormente ajustados os respectivos variogramas teóricos de referência.

A modelização consiste no ajuste, por testes progressivos e iterativos, de uma função que representa o padrão espacial de toda a zona de estudo, até à obtenção de um modelo considerado satisfatório. (www.dpi.inpe.br/Camargo) Este modelo pretende, então, descrever a continuidade, a anisotropia e as propriedades azimutais dos dados.

“A prática geoestatística de modelação de um variograma limita-se a um conjunto restrito de funções definidas positivas – modelos esférico, exponencial, Gaussiano e de potência.” que se podem observar na figura 10, segundo Soares (2006).

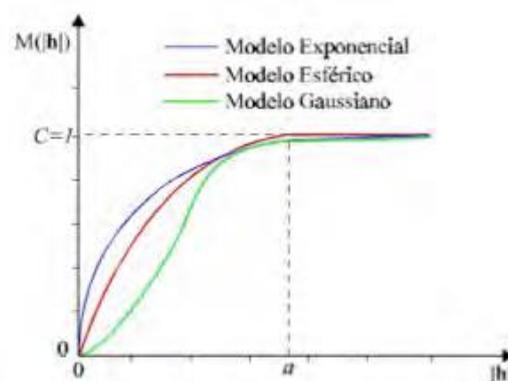


Figura 10 - Modelos teóricos de ajuste ao variograma (www.dpi.inpe.br/Camargo)

O modelo teórico base utilizado neste trabalho foi o modelo esférico, que é um dos mais usuais em geoestatística, e é definido por dois parâmetros: um patamar C, limite superior para o qual tendem os valores do variograma com o aumento dos valores de h ; e a amplitude a , distância a partir da qual os valores de $\gamma(h)$ param de crescer e são iguais a um patamar que é normalmente coincidente com a variância de $z(x)$. A amplitude mede a distância a partir da qual deixa de haver correlação para os valores de $z(x)$ (Soares, 2006).

A expressão do modelo esférico $Esf(C_i, a_i)$ é a seguinte:

$$\gamma(h) = \begin{cases} C_i \left[1.5 \frac{h}{a_i} - 0.5 \left(\frac{h}{a_i} \right)^3 \right] & \text{para } h \leq a_i \\ C_i & \text{para } h > a_i \end{cases} \quad \text{Eq. 3}$$

O efeito de pepita C_0 , também utilizado na modelização dos variogramas deste trabalho, mede duas parcelas de variabilidade total: uma que corresponde a uma pequena escala não abrangida pela malha de amostragem, outra, a variabilidade à escala da amostra induzida por erros não sistemáticos de amostragem e monitorização que acrescentam à estrutura do fenómeno um ruído aleatório. Nestes fenómenos espaciais as estruturas de continuidade frequentemente são complexas, o que se repercute na modelização por mais do que uma destas funções.

Nestas situações, o mais adequado para caracterizar a variabilidade espacial é uma combinação linear de modelos elementares, constituindo uma estrutura imbricada (Soares, 2006).

No caso de sobreposição de N_e estruturas do tipo esférico, o variograma teórico apresenta a seguinte expressão:

$$\gamma(h) = C_0 + \sum_{i=1}^{N_e} Esf(C_i, a_i) \quad \text{Eq. 4}$$

Sendo representado pelo seguinte diagrama:

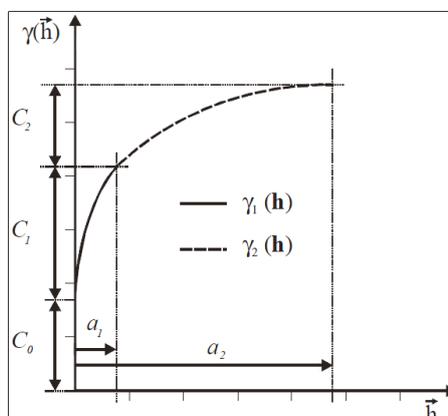


Figura 11 – Estrutura imbricada constituída por dois modelos esféricos e um de pepita (www.dpi.inpe.br/Camargo).

2.3.1 Estimação por Krigagem

A estimação linear é a etapa seguinte à variografia e recorre ao estimador geoestatístico Krigagem. A Krigagem incorpora a informação dos dados amostrados e simultaneamente recorre aos parâmetros do modelo de variograma experimental, determinados anteriormente, para estimar os valores dos pontos não amostrados.

Desde modo, são garantidas as principais características estruturais e de homogeneidade da variável na área onde se efetua a estimação.

O objetivo geral é a obtenção da imagem mais provável das características de um dado recurso que, simultaneamente, passe pelos pontos experimentais (Soares, 2006).

A equação da Krigagem Normal atribui um peso a cada amostra $z(x_\alpha)$, na estimação de cada ponto estimado, $[z(x_0)]^*$, recorrendo a ponderadores λ_α , sendo a equação que a representa a seguinte:

$$[z(x_0)]^* = \sum_{\alpha=1}^N \lambda_\alpha \cdot z(x_\alpha) \quad \text{Eq. 5}$$

e cumpre dois critérios relativamente ao erro de estimação $\varepsilon(x_0) = [z(x_0)]^* - z(x_0)$: não-enviesamento $E\{\varepsilon(x_0)\} = 0$; e a variância de estimação mínima: $\min\{var(\varepsilon(x_0))\}$.

Consiste num interpolador exato, pois quando uma amostra coincide com o ponto a estimar os valores da propriedade (estimado e real) são iguais. Neste caso a variância de estimação é nula. Considera-se o método de Krigagem do tipo BLUE (Best Linear Unbiased *Estimator* - Melhor Estimador Linear não-enviesada): lineares, porque as suas estimativas são combinações lineares ponderadas dos dados existentes; não enviesada, pois procura que a média dos erros (desvios entre o valor real e o valor estimado) seja nula; é a “melhor” porque os erros de estimação apresentam uma variância de estimação mínima.

2.3.2 Simulação condicional – Simulação sequencial direta

A simulação compreende um conjunto de técnicas geoestatísticas que dão origem a um conjunto de cenários igualmente prováveis, sendo que cada um reproduz as características do conjunto de amostras. A média de cada ponto, entre os vários cenários, deve aproximar-se ao valor obtido por estimação.

O objetivo dos modelos de simulação estocástica é a geração de um conjunto de imagens equiprováveis que reproduzem as características do conjunto das amostras, ou seja, a variabilidade e

a lei de distribuição da variável, e a sua continuidade espacial (Chiles et Delfiner,1999; Goovaerts, 1997; Journel,1994; Journel et Alabert,1989; Soares,2000, 2001, 2006).

Deste modo, estes modelos fornecem um conjunto de imagens com a mesma probabilidade de ocorrência e com a mesma variabilidade espacial dos dados experimentais, que foi previamente avaliada pelo variograma de modo a que em todas as imagens sejam reproduzidos os mesmos estatísticos de variabilidade espacial (histograma e variograma ou covariância espacial) quantificados pelas amostras (Soares, 2006; Silva, 2015).

Os métodos de simulação diferenciam-se dos métodos de estimação na medida em que, em vez de gerarem uma imagem mais provável, geram várias imagens de igual probabilidade, não se pretendendo obter a imagem com os valores mais prováveis, mas sim um conjunto de imagens onde cada uma apresenta a mesma variabilidade espacial dos dados amostrados.

Esta característica atribui a cada nó da malha vários valores possíveis que respeitam as condições anteriores sendo possível a quantificação da variabilidade local dos resultados simulados, com vista à caracterização da incerteza local de uma variável.

A simulação interessa quando estamos a estudar a probabilidade de um conjunto de pontos exceder simultaneamente um dado valor limite (Soares, 2006), como é o caso do cálculo de recursos acima de um dado teor de corte.

Do ponto de vista quantitativo, com um modelo de simulação, pretende-se reproduzir na imagem simulada a variabilidade do fenómeno em estudo basicamente através de dois estatísticos:

- a função de distribuição de $z(x)$ – $F(z) = (\text{prob } \{Z(x) < z\})$;
- variograma $\gamma(h)$.

Existem vários métodos de simulação para variáveis contínuas: Simulações baseada em métodos gaussianos, como a simulação sequencial gaussiana (Isaaks1990), *turning bands* (Matheron 1973 e Journel 1974), LU *decomposition* (Luster 1985; Alabert 1987b), simulação sequencial direta (Soares 2001), simulação direta por blocos (Journel and Huijbregts 1978), simulação por campos de probabilidade (Froidevaux 1992); ou Simulações baseadas em modelos de indicatriz (Alabert 1987a).

Também foram desenvolvidos métodos de co-simulação que produzem modelos onde a um só bloco são estimados teores de vários elementos, essas simulações para cada bloco consideram as relações de correlação entre as variáveis de teor, segundo Rossi et Deutsch, 2014.

Várias questões devem ser consideradas na escolha do método de simulação. Questões como o conhecimento detalhado do comportamento extremo do fenómeno ou a limitação do teor máximo simulado. O método deve ser decidido baseado no tipo do depósito, no modelo de função aleatória escolhido, na quantidade e qualidade das amostras avaliadas, na possibilidade de usar informação de várias fontes, e no *output* pretendido (Rossi et Deutsch, 2014).

A seleção do método de recursos mais apropriado em cada caso depende da qualidade e quantidade de informação de base, da geometria do depósito, da variabilidade da distribuição de teor, do tipo de contactos, e da disponibilidade de tempo e custo.

A geometria do depósito influencia o nível de detalhe aplicado na modelação de blocos, a variabilidade da distribuição de teor determina o nível de atenuação requerido para a estimação de blocos de mineração, o tipo de fronteira influencia o modo como o teor é estimado no contacto.

É de referir que, para a aferição prática de um método de cálculo de recursos ou reservas, se faz uma validação prática que consiste na comparação entre as estimativas com a produção, são os chamados estudos de reconciliação. Existem dois métodos: os que fazem a comparação com uma base de dados publicada e os que se baseiam em estudos de depósitos minerais reais.

O algoritmo de simulação sequencial direta para variáveis contínuas, descrito em Soares (2001), reproduz o variograma e o histograma de variáveis contínuas e evita a transformação dos valores da variável original (Soares, 2001).

A metodologia de simulação sequencial direta por zonas proposta em Nunes et al (2016) após Soares (2001) pode ser descrita pelos seguintes passos:

1 – Definição de zonas para toda a malha de simulação. Esta definição é feita pelo utilizador que atribui coordenadas, dimensões e número de blocos ao longo de cada um dos eixos coordenados (X, Y, Z).

2 – Geração de uma sequência aleatória que define um caminho aleatório para toda a malha de simulação, $u=1, \dots, N$, onde N é o número total de nós que compõem a malha de simulação e u a localização corrente do nó cuja simulação está a ser efetuada.

3 – Simulação do valor de $z^s(x_0)$:

Estimação em x_u da média local $[(z/x_u)^*]_{sk}$ e da correspondente variância de Krigagem simples $(\sigma_{sk}^2(x_u))$ condicionada aos dados experimentais originais $(z(X_\alpha))$ e aos dados vizinhos previamente simulados $(z(x_\alpha))^*$ dentro de uma vizinhança u .

No cálculo dos valores de estimação e variância feitos durante a Krigagem simples entram valores amostrais que se podem situar fora da zona que está a ser estimada, desde que se encontrem na vizinhança do ponto a ser estimado. Este facto conduz a que os valores estimados nos limites entre zonas sejam mais aproximados do real, do que se fossem limites impostos e apenas dependentes das amostras situadas dentro das zonas.

4 – Definição do intervalo da função distribuição condicional de probabilidade $F_z(z)$, à zona, que é re-amostrado consoante os valores de estimação e variância obtidos no processo de Krigagem simples.

5- Escolha de um valor de $z^s(x_0)$ a partir da função de distribuição cumulativa de $F_z(z)$.

A partir de uma distribuição gaussiana $G(y(x_0)^*, \sigma_{sk}^2(x_u))$, geração do valor y^s .

E retorno do valor simulado da variável primária $z^s(x_0) = \varphi^{-1}(y^s)$.

6 – Adicionar o valor simulado como condicionante da simulação do próximo nó a ser simulado.

7 – Repetição do mesmo procedimento até todos os nós da malha estarem simulados.

Como cada imagem simulada tem a mesma probabilidade de ocorrência é possível a avaliação da incerteza local recorrendo-se a medidas estatísticas de dispersão, como a variância e o desvio padrão.

Quanto maior for o número de simulações melhor será a descrição da incerteza, considerando-se no caso de estudo que 60 simulações é um número razoável, pois já se tem uma noção da variabilidade local em cada nó da malha e a média das simulações, em cada nó, já é próxima da estimação por Krigagem normal.

A incerteza depende do modelo de variograma utilizado, dos dados, da localização e da relação espacial entre as amostras, do método de simulação escolhido e do número de simulações geradas.

Segundo Dimitrakopoulos, 1997, um modelo de recursos “completo” não deve incluir apenas um teor estimado, ou uma distribuição da estimação, mas também uma caracterização mais detalhada da incerteza e das consequências dessa incerteza (Rossi et Deutsch, 2014).

Os métodos de Simulação Condicional descrevem a variabilidade local dos dados amostrados, tendo por base várias simulações equiprováveis do fenómeno de distribuição de teores. Mantêm, os estatísticos dos dados reproduzindo a sua lei de distribuição, a proporção de valores elevados e baixos, a média, variância, reproduzindo também a continuidade espacial dos teores amostrados com características como anisotropias e efeitos de pepita (Sinclair et Blackwell, 2006), como se pode observar na figura 12.

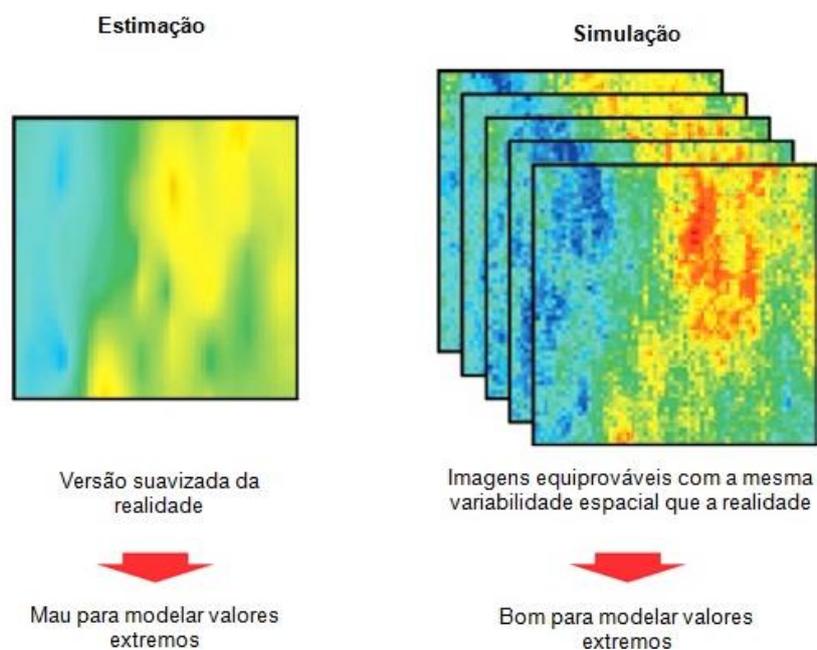


Figura 12 – Comparação entre métodos de estimação e de simulação (Rossi et Deutsch, 2014).

Os métodos de simulação permitem associar a incerteza à determinação de um teor médio para cada bloco, ou seja, quando comparados com os métodos de estimação acrescentam a quantificação da incerteza associada e a avaliação dessa incerteza espacial através do estudo dessa variabilidade como, por exemplo por mapas de probabilidade.

A simulação pretende aferir a probabilidade conjunta entre múltiplas realizações, permitindo uma representação mais completa da incerteza do bloco e da incerteza entre vários blocos (Rossi et Deutsch, 2014), como se observa na figura 13.

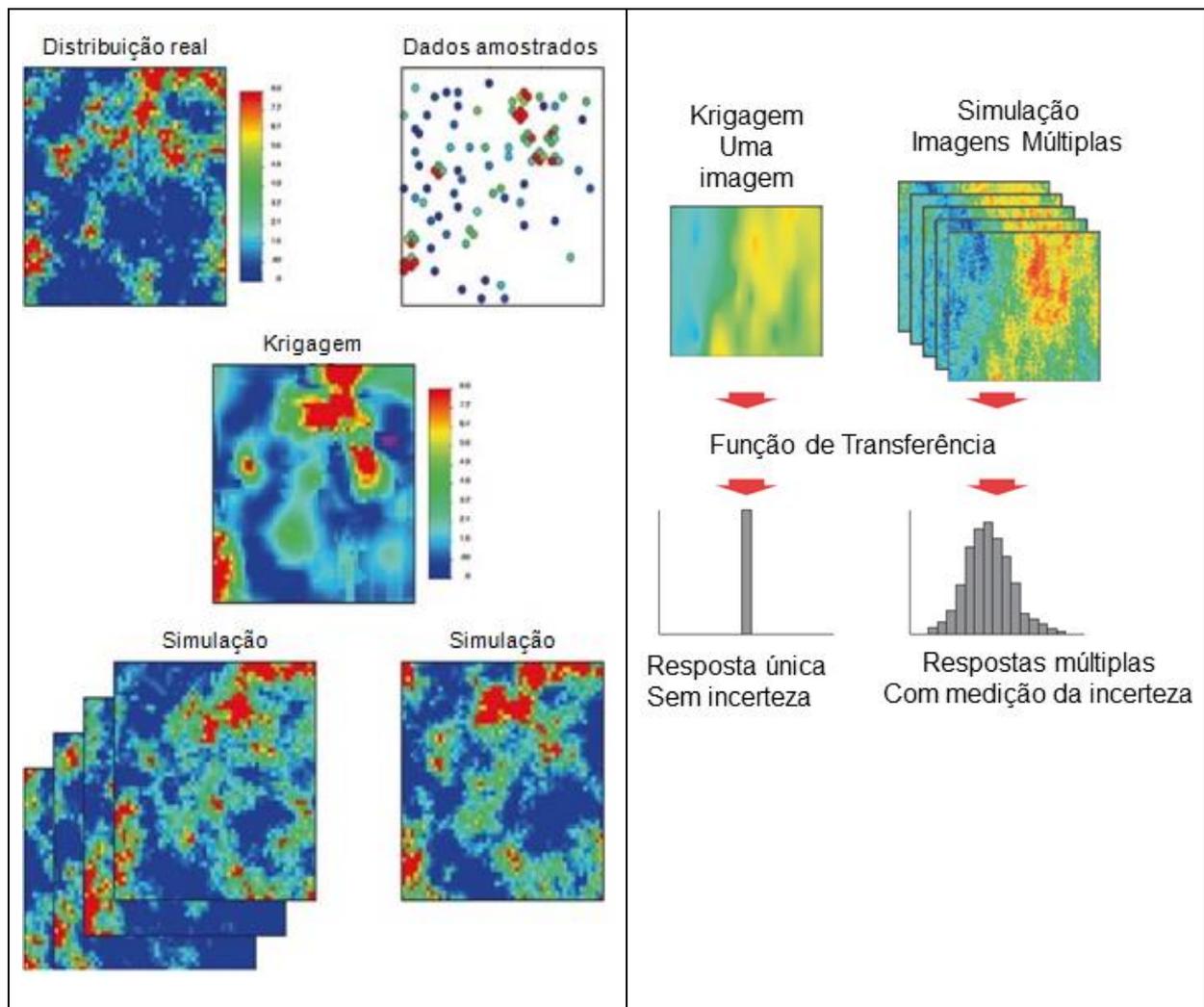


Figura 13 – Aferição de incerteza pelos métodos de simulação (Rossi et Deutsch, 2014).

Com o conjunto de imagens equiprováveis dos modelos simulados, é possível a visualização do comportamento extremo das características internas ou morfológicas de um dado recurso natural e, simultaneamente, quantificar a incerteza da localização espacial dessas características (Soares, 2006).

2.4 Enquadramento da área da Lagoa Salgada

2.4.1 Enquadramento geográfico

A metodologia utilizada foi aplicada ao sector noroeste do depósito da Lagoa Salgada. Este depósito localiza-se a 110 km a Sul de Lisboa, no concelho de Grândola, e atualmente enquadra-se numa área de prospeção e pesquisa com uma área de 134 km² que abrange as cartas topográficas militares 1/25000 N^os 485, 486, 495 496, 497 e 507 como se pode ver na figura 14.

O principal acesso à área é feito pela A2 através do nó de Alcácer do Sal, e pelo IC1 na zona de Grândola-Alcácer do Sal, existindo ainda outras estradas nacionais e municipais que a atravessam. O acesso ao depósito da Lagoa Salgada é feito pela povoação de Vale de Guiso que se pode aceder a partir de Lisboa pela A2 até à saída para Alcácer do Sal (85 Km), de seguida pelo IC1 sentido Sul (12 Km) e posteriormente 5 Km pela N382.

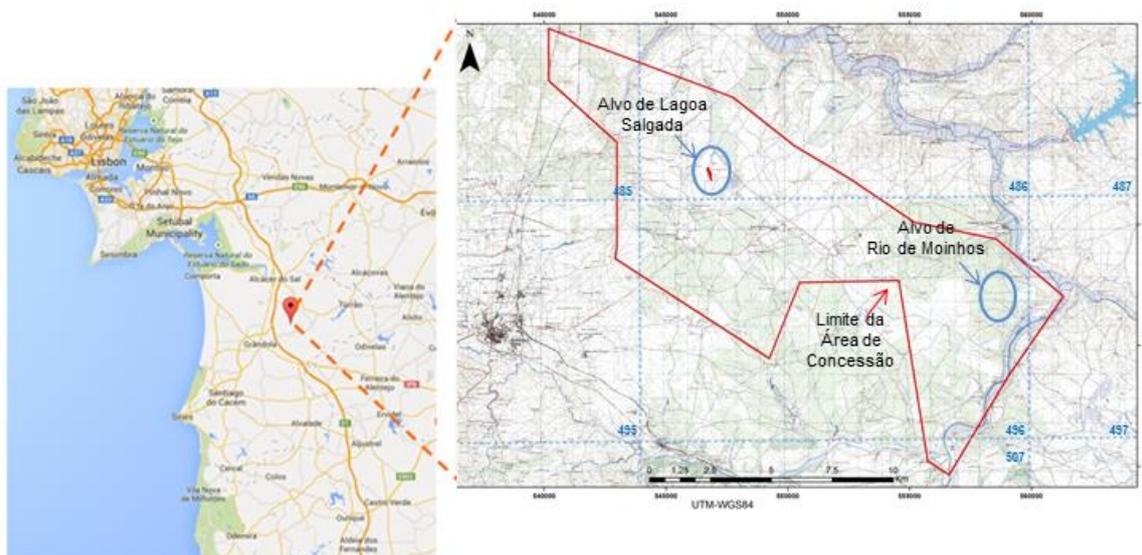


Figura 14 – Enquadramento Geográfico da área de prospeção e pesquisa da Lagoa Salgada. Limites da mesma, e localização do depósito da Lagoa Salgada e do alvo de Rio-de-Moinhos.

2.4.2 Área de concessão de prospeção e pesquisa da Lagoa Salgada

O consórcio que atualmente executa trabalhos de prospeção e pesquisa é formado pela empresa Redcorp- Empreendimentos Mineiros e pela EDM – Empresa de Desenvolvimento Mineiro.

A Redcorp Empreendimentos Mineiros, Unipessoal, Lda., é uma empresa de capitais privados de exploração e de prospeção de recursos minerais focada na aquisição e desenvolvimento de projetos de metais base e preciosos em Portugal e Espanha (www.portexminerals.com ;www.bloomberg.com).

A empresa EDM – Empresa de Desenvolvimento Mineiro (www.edm.pt) é uma empresa portuguesa de capitais públicos cuja missão abrange duas áreas de atividade: a área ambiental, que visa a “Recuperação ambiental de antigas áreas mineiras degradadas, com vista à sua reabilitação e valorização económica.”; e a área mineira, que tem as seguintes competências:

“-Conceber e executar, por si só ou em “joint ventures”, projetos de prospeção, pesquisa, avaliação e aproveitamento dos recursos geológicos da “Base de Recursos” correspondente ao território nacional, tendo em consideração o seu elevado potencial geológico e mineiro;

-Desenvolver estudos e prestar serviços nos domínios das geociências, ciências da engenharia, energia e ambiente, bem como cooperar com outras entidades, no País ou no exterior, em projetos de investigação de interesse comum;

-Servir de instrumento do Governo na assessoria técnica especializada e em intervenções estratégicas no domínio geológico e mineiro, no País e no estrangeiro.”

A área de concessão de prospeção e pesquisa da Lagoa Salgada enquadra-se geologicamente na Faixa Piritosa Ibérica, no extremo noroeste, sob uma cobertura constituída por sedimentos da bacia terciária do Rio Sado e aluviões quaternários (Oliveira et al., 1998; Tornos et al., 2006).

Esta área de concessão é de grande interesse para prospeção e pesquisa na Faixa Piritosa Ibérica, cujos trabalhos de prospeção geológica, geofísica e geoquímica revelaram a presença de vários alvos com interesse para a prospeção. Destes destacam-se a zona de Lagoa Salgada e Rio de Moinhos onde foram intersetados sulfuretos (figura 14):

- Alvo da Lagoa Salgada: Este é constituído por duas zonas principais: zona noroeste e central. A zona noroeste do jazigo da Lagoa Salgada apresenta teores interessantes de zinco, cobre, chumbo, ouro e prata e foi atravessado pela 1ª vez em 1992 pela sondagem LS04 realizada pelo Instituto Geológico e Mineiro. A mineralização encontra-se aberta em profundidade, para este e para sul.

A zona central é constituída essencialmente por um stockwork que está pouco definido tendo sido intercetado por apenas 6 sondagens estando aberta em todas as direções, necessitando portanto de mais sondagens para definir o seu volume e teores.

- Alvo de Rio de Moinhos: Neste alvo intersectou-se com a sondagem RM01 uma zona com mineralização disseminada de zinco e cobre, associada à presença de alteração hidrotermal e que também requer mais trabalhos de prospeção para definir a sua dimensão.

A área da Lagoa Salgada foi alvo de 4 campanhas de prospeção e pesquisa onde para além dos levantamentos geológicos, geofísicos e geoquímicos se realizaram várias campanhas de sondagens. Na tabela 2 salientam-se as sondagens realizadas nas diferentes campanhas de prospeção e pesquisa.

Tabela 2 – Informação relativa às campanhas de sondagens.

Campanhas	Anos	Resumos das sondagens realizadas
SFM/IGM	1991-1993	- 14 sondagens: LS1-LS14;
SRMA/EDM	1994-1998	- 26 sondagens: LS15-LS37, e RM1-RM2;
REDCORP	2005-2008	- 24 sondagens: LS05038-LS08052 e RM07003-RM08009;
REDCORP	2011-2013	- 7 sondagens: PX01-PX08.

2.4.3 Enquadramento geológico regional – Faixa Piritosa Ibérica

A Zona Sul Portuguesa (ZSP) constitui o terreno mais a Sul do Arco Varisco Ibérico (Tornos et al., 2006), sendo constituída por quatro domínios principais, designadamente Pulo do Lobo, Faixa Piritosa (FPI), Grupo do *Flysch* do Baixo Alentejo e Sector Sudoeste (Oliveira et al, 2013).

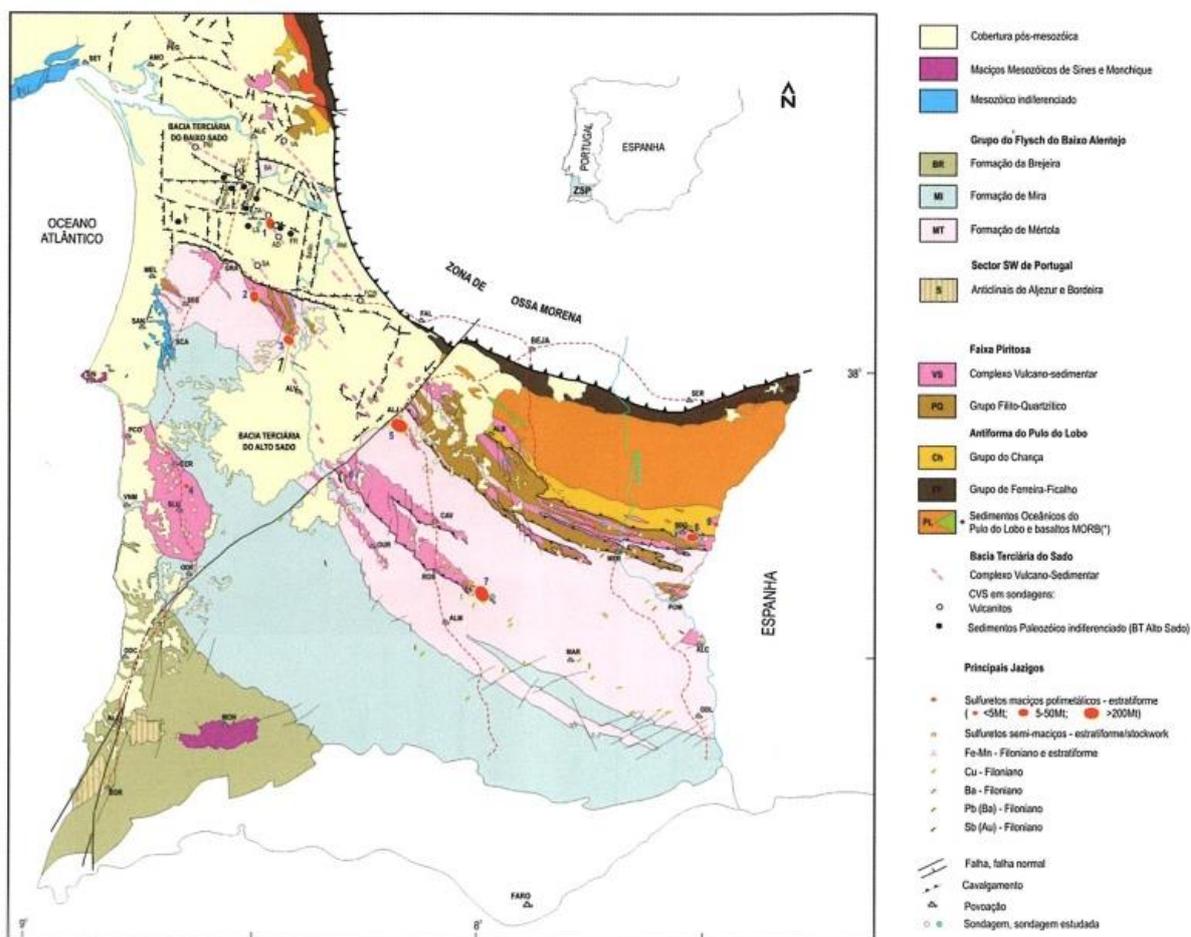


Figura 15 - Mapa Geológico esquemático da Zona Sul Portuguesa em Portugal (Oliveira et al., 2013, adapt. Oliveira, 1990, Barriga et al., 1997, V. Oliveira et al., 1998b, 2001, Carvalho et al., 1999, Leistel et al., Rosa et al., 2001, Matos et al., 2000, 2003a).

A Faixa Piritosa Ibérica situa-se a sul do antiforma do Pulo do Lobo e tem cerca de 250 Km de extensão por 60 Km de largura, estendendo-se desde a área subjacente à bacia terciária do Sado, na zona da Marateca em Portugal, a Sevilha em Espanha.

É constituída por rochas de natureza sedimentar, vulcânica e vulcano-sedimentar com idades do Paleozóico Superior que se distribuem do Devónico Médio a Superior ao Carbónico Inferior (Rosa et al., 2008), e contém jazigos estratiformes de sulfuretos polimetálicos (Oliveira et al., 2013). As rochas que constituem a FPI estão afetadas por metamorfismo regional diretamente relacionado com a deformação hercínica, sendo a fácies dominante de metamorfismo de prenhite-pumpelite, que atinge condições de fácies de xistos verdes no extremo norte (Munhá, 1983, 1990).

A FPI é caracterizada pela presença de um registo geológico relativamente simples (Schermerhorn, 1971), com uma sequência que pode atingir até cerca de 1500m de espessura.

Na Faixa Piritosa Ibérica as rochas mais antigas encontradas estão agrupadas no Grupo Filito-Quartzítico (PQ) com idade do Devónico Médio a Superior, do Givetiano ao Fameniano Superior (Oliveira et al., 2013).

Ao PQ sobrepõe-se estratigraficamente o Complexo Vulcano-Sedimentar (CVS) com idade do Fameniano ao Viseano Inferior. Estratigraficamente acima do CVS ocorre a Formação de Mértola do Grupo do *Flysch* do Baixo Alentejo (GFBA), do Viseano Superior (Oliveira et al., 2013).

Esta sequência regional apresenta-se na figura 16:

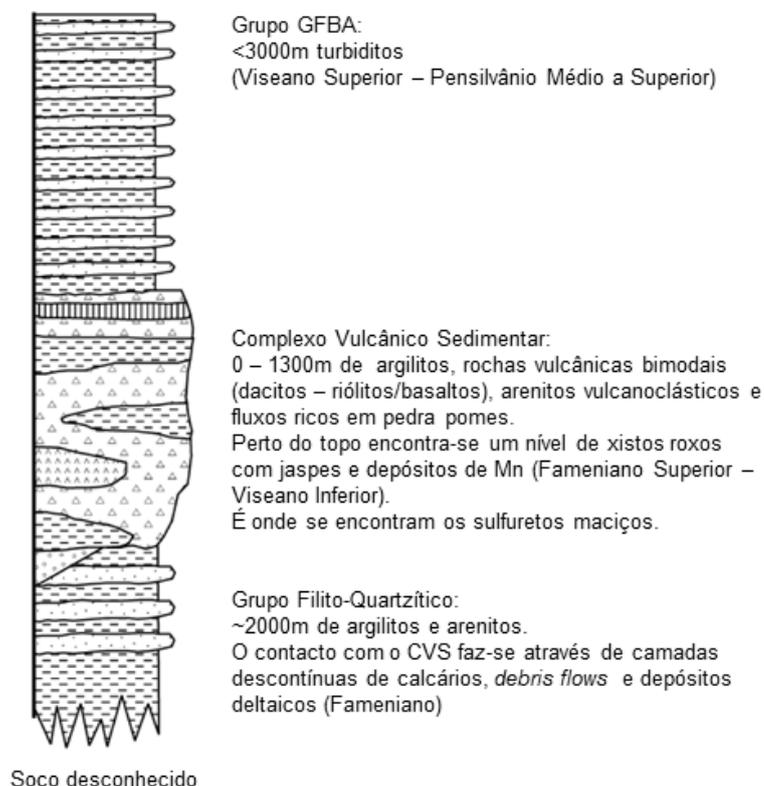


Figura 16 - Coluna estratigráfica geral, Faixa Piritosa Ibérica (modificado de Tornos et al., 2006).

- Grupo Filito-Quartzítico: PQ

O Grupo Filito-Quartzítico forma o soco detrítico e é constituído maioritariamente por filitos, quartzitos e xistos com intercalação de lentes e nódulos calcários na zona superior que se depositaram numa plataforma marinha siliciclástica (Oliveira et al., 2005).

- Complexo Vulcano-Sedimentar: CVS

O CVS inclui vários episódios vulcânicos, tanto de rochas intrusivas como extrusivas, dominadas por riólitos, riodacitos, basaltos e alguns andesitos, que ocorrem intercaladas com xistos negros, castanhos, bege, cinzentos, verdes e xistos borra de vinho, siltitos, jaspes e rochas vulcaniclásticas (Oliveira et al., 2005).

O CVS evidencia variações laterais de fácies e de espessura próprias de regiões vulcânicas com vulcanismo muito ativo. O vulcanismo ácido, com riólitos e riodacitos, é claramente dominante, em volume, sobre o vulcanismo básico e, mais raramente, intermédio. Este vulcanismo variado ocorreu predominantemente em ambiente marinho numa bacia que teria profundidade variável com zonas pouco oxigenadas, como atesta a presença de xistos negros que ocorrem ao longo de toda a sucessão e outras em que a profundidade seria menor e onde se formaram xistos em ambiente oxidante. É notável a grande expressão dos xistos borra de vinho com intercalações de jaspes, na parte superior do CVS, quase sempre associados a sedimentos vulcaniclásticos finos e xistos siliciosos esverdeados, estes com intercalações de chertes (Oliveira et al., 2013).

As mineralizações de sulfuretos maciços ocorrem associadas a rochas vulcânicas félsicas e/ou xistos negros. A formação de massas de sulfuretos ocorre no fundo do mar, por ascensão de fluidos hidrotermais por chaminés que originam uma lente de sulfuretos maciços, através de uma rede de canais, mais ou menos espessos, que formam um *stockwork*. Associados a estes sistemas mineralizantes ocorre alteração sericítica, siliciosa e clorítica. A zonação dos metais consiste genericamente na ocorrência de uma zona de cobre no *stockwork* e na base da lente de sulfuretos, seguida por uma zona superior que é rica em zinco e chumbo no maciço, que se estende lateralmente (Inverno et al., 2015).

- Grupo do *Flysch* do Baixo Alentejo: GFBA

O Grupo do *Flysch* do Baixo Alentejo, constitui uma sucessão de sedimentos turbidíticos profundos, que foram divididos em três unidades litoestratigráficas, designadamente as formações de Mértola, Mira e Brejeira (Oliveira et al., 1979; Oliveira, 1983). A Formação de Mértola sobrepõe-se diretamente ao CVS, à exceção do sector do Cercal do Alentejo onde é a Formação de Mira que contacta com este complexo. A Formação de Mértola é constituída por bancadas, de espessura centimétrica a métrica, de grauvaque, que alternam com xistos argilosos e siltitos, e ainda níveis de conglomerados e de raros depósitos de torrentes de lama intercalados na sucessão (Oliveira et al., 2013).

Em termos regionais, a Faixa Piritosa Ibérica pode dividir-se em dois ramos principais (Oliveira, 1990): um Ramo Sul, com estruturas tectónicas anticlinoriais enraizadas onde a sucessão estratigráfica PQ/CVS/GFBA se mantém, em termos gerais, na sua ordem normal ou afetada por cavalgamentos restritos aos flancos inversos das dobras; e um Ramo Norte onde o par PQ/CVS

aparece sistematicamente sobreposto por escamas tectónicas envolvendo quartzitos e xistos do PQ e rochas vulcanoclásticas finas do CVS. As mineralizações ocorrem no CVS, em profundidade sob os sedimentos cenozóicos da Bacia do Sado, como foi recentemente provada por sondagens profundas realizadas no âmbito da prospeção de sulfuretos maciços nesta bacia (V. Oliveira et al., 1998; 2001, Matos et al., 1998; 2000; 2003). Estes estudos indicam também a existência de eixos vulcânicos com orientação predominante para NW, que estão deslocados por falhas que originam horts e grabens, provavelmente de idade cenozóica (Oliveira et al., 2013).

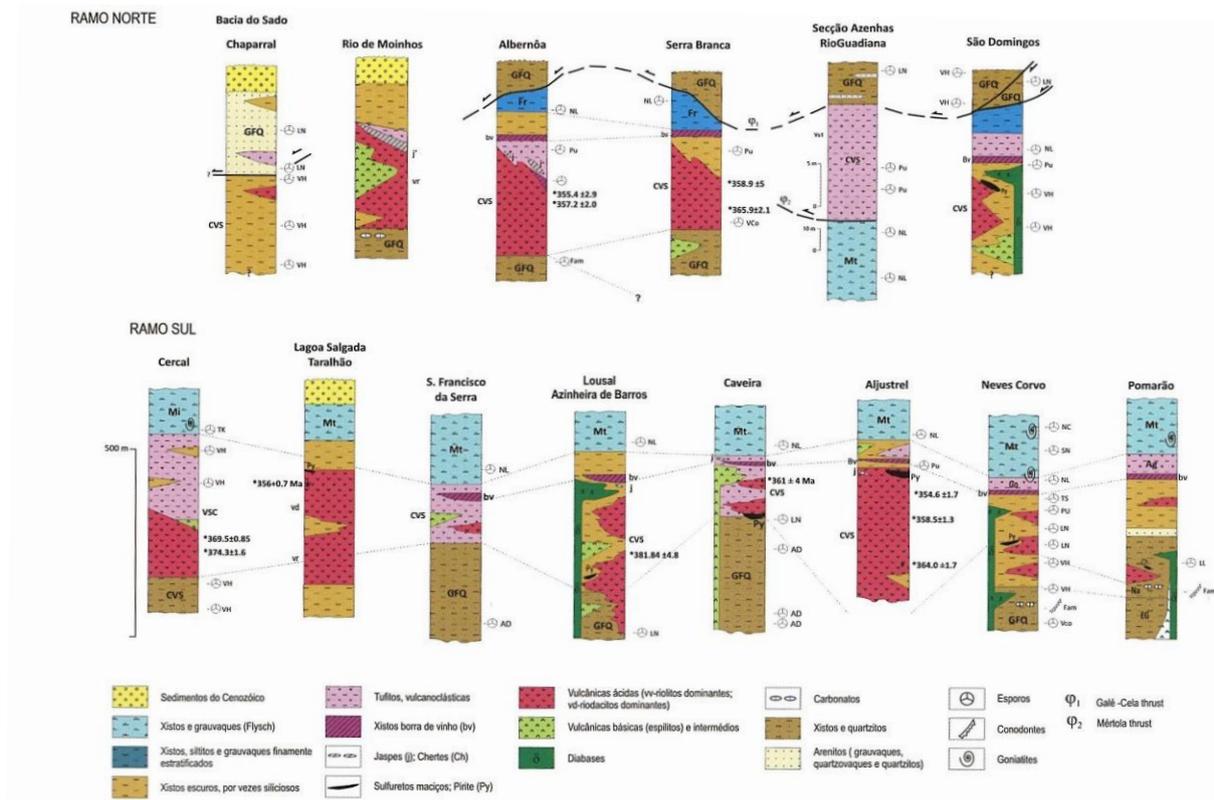


Figura 17 - Colunas estratigráficas sintéticas mais representativas da Faixa Piritosa, com separação entre Ramo Sul e Ramo Norte (Oliveira et al., 2013).

A concessão de prospeção e pesquisa de Lagoa Salgada localiza-se no Ramo Sul da Faixa Piritosa Ibérica, estando esquematizada na figura 17 pelo eixo Lagoa Salgada-Taralhão. O presente trabalho incide apenas sobre o sector noroeste do depósito da Lagoa Salgada.

2.4.3.1 Metalogénese da Faixa Piritosa Ibérica

Os depósitos de sulfuretos maciços da Faixa Piritosa Ibérica agrupam-se em diferentes estilos de mineralização, que refletem a formação em diferentes cenários geológicos (Tornos, et al. 2006). Os processos inerentes à formação e características dos depósitos de sulfuretos maciços

vulcanogénicos (VMS) estão relacionados com o ambiente em que estes ocorrem. Estes processos caracterizam-se por alteração, que é devida à interação entre a subida dos fluidos hidrotermais de alta temperatura, a água do mar e as litologias das rochas encaixantes. A precipitação dos sulfuretos ocorre no fundo do mar, mas frequentemente pode ocorrer nas rochas de natureza sedimentar ou volcanoclástica que ainda não se encontram consolidadas, levando à precipitação de minerais de sulfuretos nos poros e por substituição, segundo Gibson, et al. (2007).

Foram propostos diferentes modelos para a FPI onde se considera que os metais são principalmente ou totalmente lixiviados a partir das rochas vulcânicas (Schermerhorn, 1975; Williams et al., 1975; Barriga, 1990; Sáez et al., 1996; Carvalho et al., 1999), no entanto, outros autores sugerem que os maiores reservatórios de metais sejam as rochas detríticas do Grupo do PQ ou mesmo um soco mais antigo (Tornos and Spiro, 1997, Spiro 1999; Saéz et al., 1999; Relvas et al., 2001).

Em Neves Corvo, no ramo Sul da Faixa Piritosa Ibérica, para além da água do mar e de fontes hidrotermais convencionais, houve a contribuição de uma fonte externa de origem magmática ou metamórfica (Relvas, 2000; Relvas et al., 2001). Alguns dos processos fortemente responsáveis pela eficiência e grande dimensão dos sistemas de formação deste depósito, foram processos de substituição de sulfuretos e silicatos. Estes, ocorreram extensamente sobre as rochas vulcânicas da sequência de muro e em disseminações por substituição de mineralização em unidades volcanoclásticas e/ou sedimentares, segundo Relvas, et al. (2014). Neste depósito, observa-se também a ocorrência de correlação entre as diferenças do tipo de fácies e as da morfologia do *stockwork* e do minério disseminado o que pode refletir a porosidade original e a permeabilidade na interação com o sistema hidrotermal mineralizante (Rosa et al., 2008).

Na metalogénese deste tipo de depósitos ocorre um processo fundamental para a formação de um depósito económico, denominado por *zone refining*, que consiste no processo pelo qual o conteúdo num determinado metal aumenta, incrementando a concentração desse metal em certas zonas. Este zonamento desenvolve-se devido ao intenso gradiente térmico que existe dentro de uma lente de sulfuretos, quente na base e frio para o topo. Os fluidos de alta temperatura, que vão progressivamente entrando na base da lente de sulfuretos, vão precipitando cobre na base e no interior da lente e dissolvendo zinco, chumbo (+/- ouro) que se vão movimentando para fora, levando a que na zona externa da lente se concentre o zinco, chumbo e ouro. (Eldridge, et al, 1983; Gibson, 2007).

2.4.4 Enquadramento geológico local - Depósito da Lagoa Salgada

O depósito da Lagoa Salgada foi descoberto pelo IGM/SFM usando métodos gravimétricos (Oliveira et al. 1998). Localiza-se a 80 km de Neves-Corvo, para noroeste deste jazigo, como pode ser observado na figura 18. Os sulfuretos maciços com altos teores de zinco foram intersectados em 1992 na zona noroeste. O depósito da Lagoa Salgada é atualmente um jazigo de pequenas

dimensões (estimadas em, pelo menos, 4.5 Mt) que ainda não está totalmente delineado sendo atualmente objeto de trabalhos de prospeção.

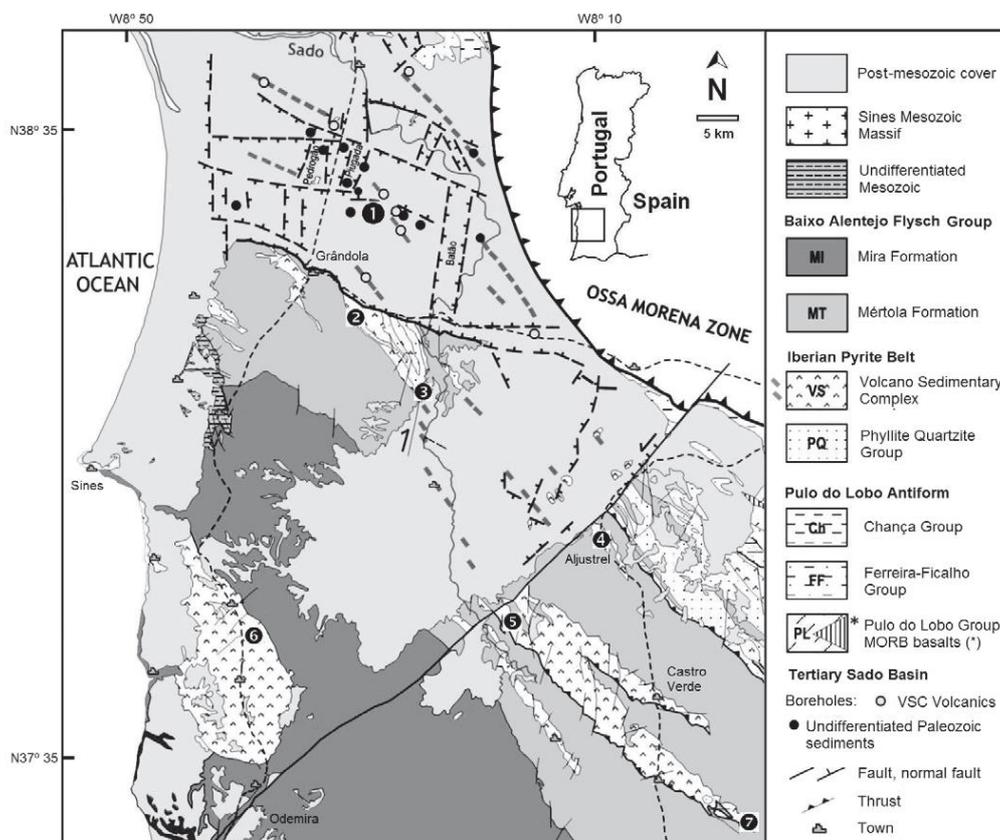


Figura 18 - Enquadramento geológico regional do depósito da Lagoa Salgada, NW da Faixa Piritosa Ibérica. Depósitos de sulfuretos Maciços: 1 = Lagoa Salgada, 2 = Caveira, 3 = Lousal, 4 = Aljustrel, 5 = Montinho, 6 = Salgadinho, 7 = Neves Corvo (adaptado de Oliveira et al., 2011).

O depósito da Lagoa Salgada encontra-se sob cerca de 130m de espessura de sedimentos terciários da bacia do Sado, no eixo vulcânico Lagoa Salgada-Taralhão. A sequência litológica do depósito da Lagoa Salgada é constituída por dois corpos vulcânicos espessos, o inferior de composição riolítica e o superior predominantemente riodacítico (V. Oliveira et al., 1998, Matos et al., 2000). Entre eles aparecem xistos negros interestratificados com espessura decamétrica, e a topo do corpo superior depositaram-se os sulfuretos maciços, com o *stockwork* instalado nas rochas vulcânicas imediatamente subjacentes que se encontram afetados por uma forte alteração, clorítica, sericítica e siliciosa, típica destes sistemas mineralizantes. Sobre o conjunto jazem xistos e siltitos finamente estratificados, com passagens de tufos finos da parte inferior, que passam gradualmente aos turbidíticos da Formação de Mértola. Uma datação U/Pb em zircões obtidos nas rochas vulcânicas superiores forneceu a idade de 356.3± 0.7 Ma (Barrie et al., 2002), correspondente ao Tournaisiano Inferior (Oliveira et al., 2013). Devido à deformação das unidades geológicas a mineralização está dobrada e falhada encontrando-se verticalizada. Tanto a norte como a sul o depósito encontra-se delimitado por falhas de direção este-oeste.

2.4.5 Mineralização – Depósito da Lagoa Salgada

A mineralização, conhecida por intersecções de sondagens, é constituída predominantemente por pirite, com alguma esfalerite, tetraedrite-tenantite, arsenopirite, calcopirite, galena, estanita, e minerais supergênicos. Podem-se observar a sua paragénese e algumas características nas figuras 19 e 20.

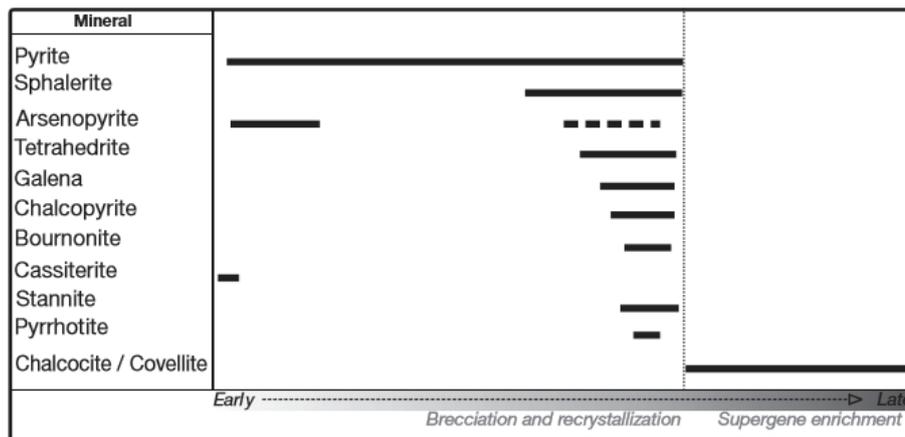


Figura 19 – Resumo da sequência paragenética da Lagoa Salgada (Oliveira et al., 2011).

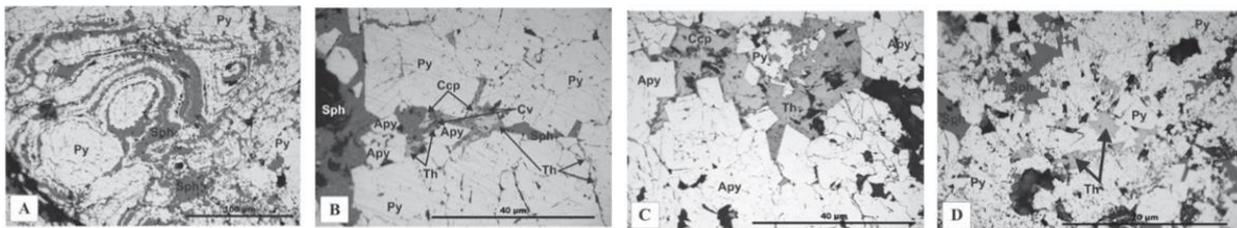


Figura 20 – Características da mineralização da Lagoa Salgada. A – Pirite e Esfalerite colofórmica (LS1). B – Esfalerite dentro de pirite maciça, com várias inclusões de calcopirite (com doença de calcopirite – CCP), com covelite e tetraedrite (LS4). C – Arsenopirite com tetraedrite e calcopirite (LS4). D – Tetraedrite e esfalerite intersticiais e pirite recristalizada (LS1) (Oliveira et al., 2011).

A mineralização ocorre sob diversas formas:

- Sulfuretos maciços, que ocorrem no sector noroeste do depósito da Lagoa Salgada, constituído essencialmente por pirite, calcopirite (minério de cobre), esfalerite (minério de zinco), e galena (minério de chumbo) acompanhadas por outros minerais metálicos em menor quantidade;
- *Stockwork* – zona de sulfuretos disseminados e em veios, onde, para além da pirite, ocorre calcopirite, esfalerite e galena;
- *Gossan* – produto de processo de oxidação que ocorre sobre os sulfuretos (maciços ou disseminados), constituído essencialmente por óxidos e hidróxidos de ferro com ouro e prata.

Na mineralização ocorrem ainda outros metais que poderão ter interesse na valorização do depósito tais como ouro, prata, estanho, e índio.

O depósito da Lagoa Salgada está subdividido em dois sectores principais, o sector noroeste, onde ocorrem sulfuretos maciços e o sector central, com mineralização de tipo *stockwork*. O sector noroeste do depósito da Lagoa Salgada, com orientação principal N20°W, apresenta 470m de comprimento por 270m de largura e 400m de profundidade, segundo o modelo tridimensional apresentado na figura 21. Este modelo foi efetuado no *software Target* da *Geosoft* e foi modelado a partir de secções verticais de direção N70°W espaçadas de 50m em 50m, transversais à direção principal das massas mineralizadas (Folha, 2015). Em cada secção, a partir das sondagens que a atravessavam e das interpretações em secções contíguas, desenharam-se os contornos dos vários corpos geológicos: falhas, cobertura terciária e massas mineralizadas. Posteriormente, *software* procede à interpolação automática dos contornos previamente definidos em cada secção, gerando cada sólido de massa mineralizada individualmente (Folha, 2015).

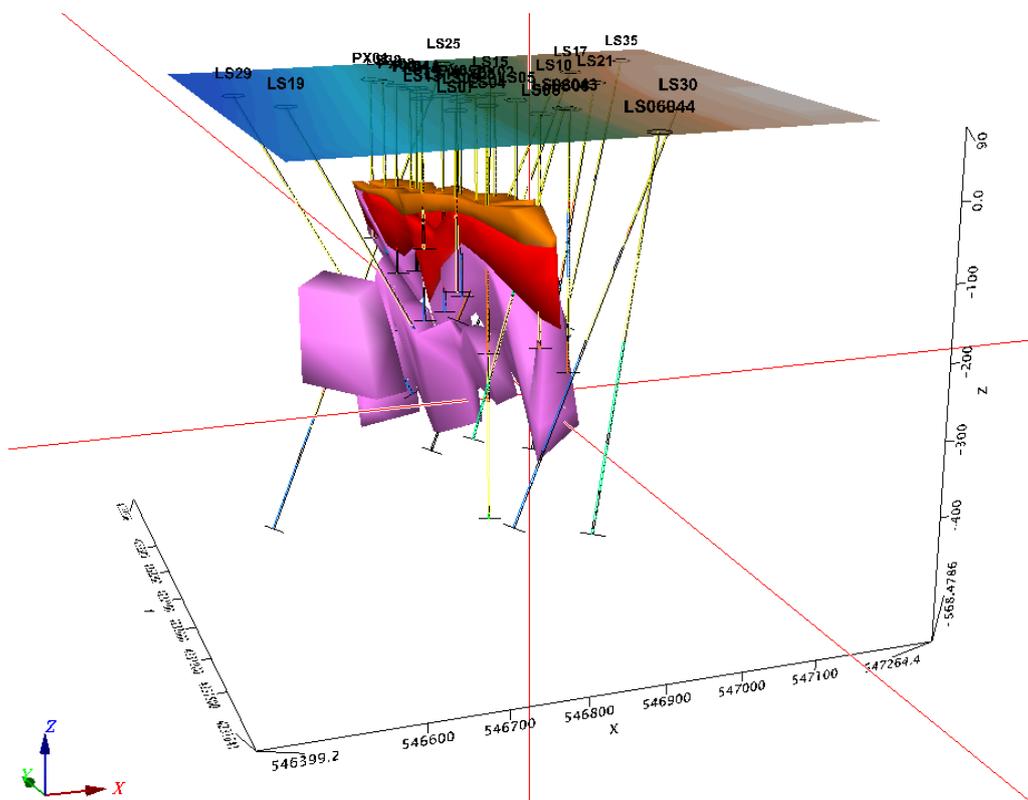


Figura 21 - Modelação geológica 3D da mineralização do sector noroeste da Lagoa Salgada, com topografia e sondagens, vista de sul (Folha, 2015).

O sector central encontra-se 200m para SE deste, apresentando cerca de 800m de comprimento e 300m de largura sendo os seus limites pouco conhecidos uma vez que é intersectado por um número limitado de sondagens. O último relatório de cálculo de recursos publicado sobre o depósito da Lagoa Salgada, referenciado como “Lagoa Salgada NI 43-101 *Technical Report and Resource Estimate*” de Janeiro de 2012, facultado pela REDCORP reporta que o recurso mineral do depósito da Lagoa Salgada está classificado com recursos indicados e inferidos baseando-se esta classificação no espaçamento entre furos, localização dos mesmos e dados das amostras. Neste relatório é utilizada a percentagem de zinco equivalente (ZnEQ%) como parâmetro para estimação do cálculo de recursos. A ZnEQ% é função dos teores dos cinco elementos estimados, cobre (Cu), zinco (Zn), chumbo (Pb),

prata (Ag) e ouro (Au), preço de metal e recuperações aproximadas para cada elemento, correspondendo à soma ponderada da multiplicação de teor de cada elemento (x_i) pelo preço (x_p) recuperação do elemento (x_r) e fator de correção do preço em libras ou onças de troia.

$$ZnEQ\% = \frac{(Zn_p Zn_t Zn_r 22.05) + (Pb_p Pb_t Pb_r 22.05) + (Cu_p Cu_t Cu_r 22.05) + (Ag_p Ag_t Ag_r 31.1) + (Au_p Au_t Au_r 31.1)}{22.05} \quad \text{Eq. 6}$$

O recurso mineral estimado para o depósito com um cut-off de 3.5 % de ZnEQ% é constituído por 2.9Mt de Recursos Indicados com 2.94% Pb, 3.40% Zn, 0.34% Cu, 54.72 g/t Ag, 0.82 g/t Au e um 7.18 % ZnEQ e um Recurso Inferido de 1.6Mt com 2.50% Pb, 1.80% Zn, 0.35 Cu%, 51.00 g/t Ag, 0.78 g/t Au e 5.54 % de ZnEQ.

Tabela 3 – Recursos Indicados para o depósito da Lagoa Salgada

ZnEq(%) Cut-off	Densidade (t/m ³)	Tonelagem (t)	Pb (%)	Zn (%)	Cu (%)	Ag (g/t)	Au (g/t)	ZnEq (%)
7.00	4.52	1342	3.73	5.46	0.32	64.80	1.14	9.84
6.50	4.52	1533	3.60	5.19	0.32	63.29	1.09	9.46
6.00	4.50	1656	3.53	5.02	0.32	61.99	1.06	9.22
5.50	4.48	1846	3.41	4.73	0.33	60.18	1.02	8.86
5.00	4.45	2027	3.33	4.45	0.33	58.82	0.98	8.53
4.50	4.43	2290	3.22	4.09	0.34	58.82	0.93	8.10
4.00	4.41	2573	3.10	3.76	0.34	57.05	0.88	7.67
3.50	4.37	2942	2.94	3.40	0.34	54.72	0.82	7.18

Tabela 4 – Recursos Inferidos para o depósito da Lagoa Salgada

ZnEq(%) Cut-off	Densidade (t/m ³)	Tonelagem (t)	Pb (%)	Zn (%)	Cu (%)	Ag (g/t)	Au (g/t)	ZnEq (%)
7.00	4.35	281	2.80	2.91	0.54	76.80	1.30	8.01
6.50	4.32	416	2.68	2.77	0.50	74.78	1.24	7.61
6.00	4.34	527	2.58	2.71	0.49	71.94	1.16	7.33
5.50	4.20	693	2.78	2.51	0.43	65.27	1.05	6.97
5.00	4.16	861	2.76	2.29	0.42	62.46	0.98	6.64
4.50	4.10	1031	2.76	2.13	0.39	58.94	0.93	6.33
4.00	4.05	1280	2.67	1.93	0.37	55.08	0.86	5.93
3.50	4.04	1554	2.50	1.80	0.35	51.00	0.78	5.54

Dos trabalhos anteriores concluiu-se que há potencial para se aumentarem os recursos conhecidos, pois a mineralização do sector noroeste da Lagoa Salgada está aberta a este, sul e em profundidade, encontrando-se também o sector central da Lagoa Salgada aberto em todas as direcções.

3 Metodologia

A metodologia utilizada para o estudo apresentado nesta dissertação consistiu nas etapas evidenciadas na figura 22, algumas delas já abordadas na secção 2.3 - Geoestatística.

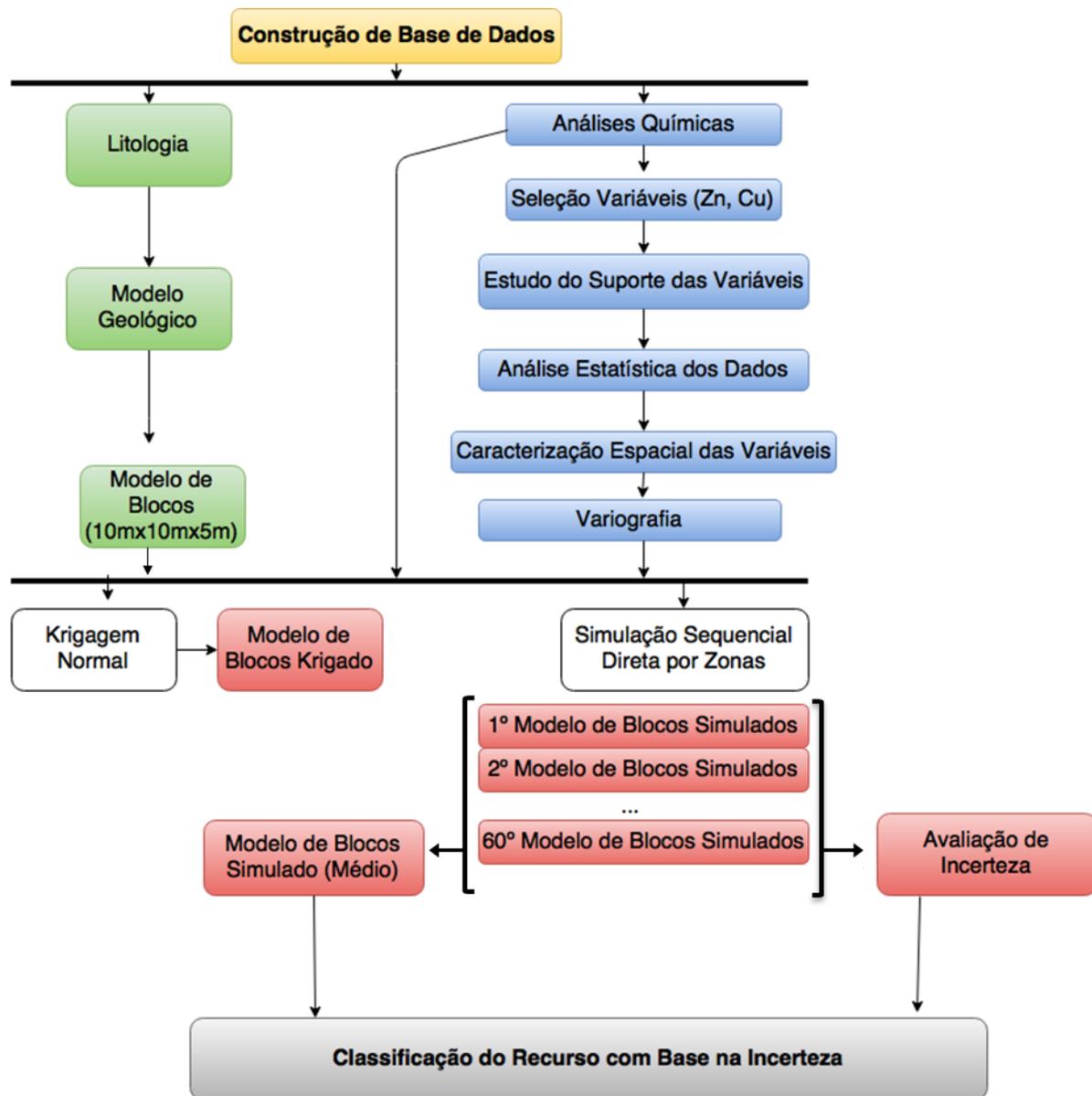


Figura 22 – Metodologia utilizada.

A partir de informação de sondagens construiu-se uma base de dados tendo sido utilizados os dados de litologia e de teor de elementos químicos analisados, de acordo com o procedimento evidenciado na figura 22, nas seguintes etapas:

- Desenho do modelo geológico tridimensional: Tendo por base as descrições litológicas, de geologia estrutural, e de mineralização das sondagens modelam-se tridimensionalmente os vários corpos

geológicos com interesse para a interpretação geológica e para a definição de áreas de diferentes tipos de mineralização. Identificam-se e delimitam-se os vários corpos geológicos, falhas principais, e diferentes corpos de mineralização. O modelo geológico define os domínios onde se faz a inferência espacial. Simultaneamente, identifica-se e estuda-se se certas características, como zonas com teores mais elevados ou baixos, são preponderantes nalgum corpo geológico.

- Seleção das variáveis importantes ao estudo: Através da análise da informação existente, selecionam-se as variáveis a estudar. Observam-se os tipos de dados e a sua estrutura. Identifica-se o tipo de amostragem, retiram-se valores de dados duplicados, observam-se a ocorrência de amostras com valores anómalos e verifica-se a existência de agrupamentos preferenciais de amostras.

- Estudo do suporte da variável: Identifica-se o tipo de suporte de amostragem e analisa-se a variação de comprimentos das amostras. Vê-se a influência que o tipo de suporte tem no restante trabalho.

- Análise estatística dos dados: Procede-se ao estudo de estatística univariada e bivariada, recorrendo-se a ferramentas estatísticas simples como média, mediana, máximo, mínimo, quartis e percentis, variância, histogramas; e, para a estatística bivariada a diagramas de dispersão, e a diferentes instrumentos de análise de regressão.

- Caracterização espacial da variável: Visualiza-se os dados tridimensionalmente, de modo a ser possível a observação da sua dispersão espacial, distância média entre amostras, etc. Começa-se a identificar as principais características de dispersão espacial como reconhecimento de principais direções de distribuição das amostras e valores tridimensionalmente, possível identificação de anisotropias, de valores extremos, de zonas de aglomeração de valores extremos ou descontinuidades. É nesta fase que se faz uma primeira abordagem aos parâmetros de variografia: direções, distâncias e “classes de ângulos.” (Soares, 2006)

- Variografia - Estudo do variograma experimental: Estudam-se vários parâmetros de variograma experimental, direções, tipo de modelos, número de estruturas, amplitudes, número de intervalos, etc. Define-se o melhor modelo de ajuste aos dados experimentais, que reproduza os principais padrões de continuidade espacial de cada variável em cada tipo de mineralização. Na finalização do processo de modelização de variografia recorre-se à validação cruzada (*cross validation*) pretendendo-se aferir o modelo escolhido. Este processo é descrito da seguinte forma: recorrendo-se a *software* como GeoMS1, retira-se uma amostra real e faz-se a estimação por Krigagem normal tentando-se garantir que o valor estimado da variável no nó correspondente à amostra retirada seja semelhante ao valor

da amostra retirada, a partir da aplicação do variograma experimental definido. Este processo ocorre para cada amostra e é gerado um relatório cujos dados depois são avaliados. Tenta-se que o desvio do valor de amostra seja mínimo.

- Modelo de blocos: Considerando o espaçamento das sondagens, a distribuição das amostras ao longo das sondagens e os estudos de cálculo de recursos previamente efetuados na área, é definida uma malha de estimação e simulação. Esta é caracterizada pela sua origem, número de blocos em cada dimensão e dimensão dos mesmos. Faz-se a rotação dos eixos coordenados dos modelos de blocos de modo a que o eixo principal do jazigo e o eixo principal da variografia sejam coincidentes com uma das 3 direções principais da malha de estimação e simulação.

- Estimação: Efetua-se a estimação por Krigagem normal, para posteriormente se comparar este resultado com a média das simulações em cada bloco da malha. Este procedimento é seguido para cada variável em cada tipo de mineralização, entrando os valores das amostras e os parâmetros de variografia respetivos, posteriormente os valores estimados são separados por zonas mineralizadas.

- Simulação sequencial direta por zonas: Como descrito em 2.3, a simulação sequencial direta por zonas descrita em Nunes et al, 2016, recorre a um programa DSS.exe, do CERENA disponibilizado por Ruben Nunes, que utiliza a regionalização da malha de simulação como base para a escolha dos parâmetros dos variogramas previamente definidos e entra em consideração com as amostras por zona. São realizadas 60 simulações para uma malha discretizada numa razão de 4x4x5 e, posteriormente utiliza-se um ficheiro de *upscaling* de modo a que em cada bloco da malha esteja a média destes valores. Garante-se a influência do valor das amostras de zonas contíguas dentro do elipsoide de busca.

- Avaliação da Incerteza: Separam-se os valores da simulação por tipos de mineralização, de modo a que se possam estudar as características de estatística univariada para as simulações e compará-las com os dados, retirando o efeito volumétrico da simulação. Para cada bloco, estudam-se a variabilidade dos valores simulados, sua variância, desvio padrão relativo e intervalo interquartilício relativo.

-Classificação do recurso com base na incerteza: Utilizam-se diferentes valores de *threshold* para separar os vários tipos de recurso. Todas as especificidades da informação incorporada e descrita anteriormente contribuem para esta classificação: número de amostras, distância entre amostras, variação de teores, variabilidade de teores por zona, anisotropias e continuidade estrutural.

4 Resultados e Discussão

O estudo divide-se em várias fases, seguindo a metodologia apresentada no capítulo anterior, iniciando-se com a análise crítica da informação disponível e com a seleção das variáveis a estudar, zinco e cobre, seguindo-se uma análise univariada e bivariada das variáveis selecionadas. Foi decidido o estudo por tipo de mineralização, *gossan* (GOS), maciço (MSX) e *stockwork* (STWK), devido às diferenças geológicas, de distribuição de teores, mineralógicas e que implicam diferenças no tratamento dos minérios associados. De seguida, apresentam-se os resultados da variografia e procede-se à estimação por Krigagem normal e à simulação por simulação sequencial direta por zonas. Quantifica-se a incerteza associada às 60 simulações com o objetivo de se quantificar e traçar mais adequadamente a separação entre recurso indicado/inferido no cálculo de recursos recorrendo ao intervalo interquartilico relativo. Na estatística básica e na Krigagem recorreu-se ao *software* GeoMS1. Para o cálculo de simulação sequencial por zonas usou-se um programa interno ao CERENA desenvolvido por Ruben Nunes. Para a visualização utilizaram-se os *software* GeoMS1, GeoMS2 e SGems.

4.1 Análise crítica da informação existente e seleção das variáveis a estudar

A informação original relativa às sondagens foi disponibilizada pela EDM e REDCORP, sendo proveniente do ficheiro de base de dados cedido pela REDCORP (2014) e do Relatório de Atividades de Prospeção e Pesquisa-Relatório Final (Setembro de 2013) e compilada num ficheiro Excel no âmbito da unidade de Estágio Curricular do Mestrado em Engenharia Geológica e de Minas, realizado no 1º semestre de 2014/2015. É de salientar que não houve oportunidade de observar as sondagens, nem de voltar a fazer as descrições geológicas, pelo que, os trabalhos prévios a essa modelação foram de tratamento da base de dados, com inventariação da informação das várias campanhas de sondagem e com atribuição de novos códigos geológicos.

A informação disponível identificada, que é relativa a 71 sondagens carotadas na zona de concessão, foi compilada num ficheiro Excel com indicação de:

- *Header* – identificação da sondagem e coordenadas da boca de sondagem (X, Y, Z) com o sistema de coordenadas UTM-ED50,
- *Surveys* – orientação de sondagem (azimute e inclinação no início, ao longo e no final da sondagem),
- *Litho* – códigos (Rockcode, Mod1,2,3) e descrições de litologias e de mineralização,

- Assays – intervalos amostrados ao longo da sondagem e resultados das análises químicas efetuadas para teores de zinco (Zn), cobre (Cu), chumbo (Pb), prata (Ag),ouro (Au) e estanho (Sn).

O sector noroeste da Lagoa Salgada, na zona modelada, inclui 20 sondagens com a indicação de 1337 amostras.

Este sector foi previamente modelado tridimensionalmente, no *software Target* da Geosoft (ver figura 21 na secção 2.4), onde se evidencia que as zonas mineralizadas se situam abaixo dos 130m de profundidade, sob uma descontinuidade geológica, cobertas por camadas de sedimentos da bacia terciária do Sado (como descrito em 2.4.5) e se desenvolvem genericamente das zonas mais superficiais onde ocorre o *gossan*, passando a sulfuretos maciços na zona intermédia, e a *stockwork* nas zonas mais profundas e distais estando, em alguns casos, compartimentadas por falhas geológicas.

Através do estudo efetuado sobre as descrições geológicas e a mineralização das sondagens constatou-se que, no sector noroeste do jazigo da Lagoa Salgada, ocorrem genericamente 3 tipos de mineralização: *gossan*, maciço e *stockwork*. A orientação preferencial do jazigo é de N20°W, encontrando-se as mineralizações de maciço e *stockwork* verticalizadas.

A modelação geológica realizada perfaz um total de 8 massas geológicas, *Gossan* este, *Gossan* oeste, Maciço este, Maciço oeste, *Stockwork* este, *Stockwork* central, *Stockwork* oeste e *Stockwork* oeste b), associadas a cada tipo de mineralização respetivamente, como é observável na figura 23.

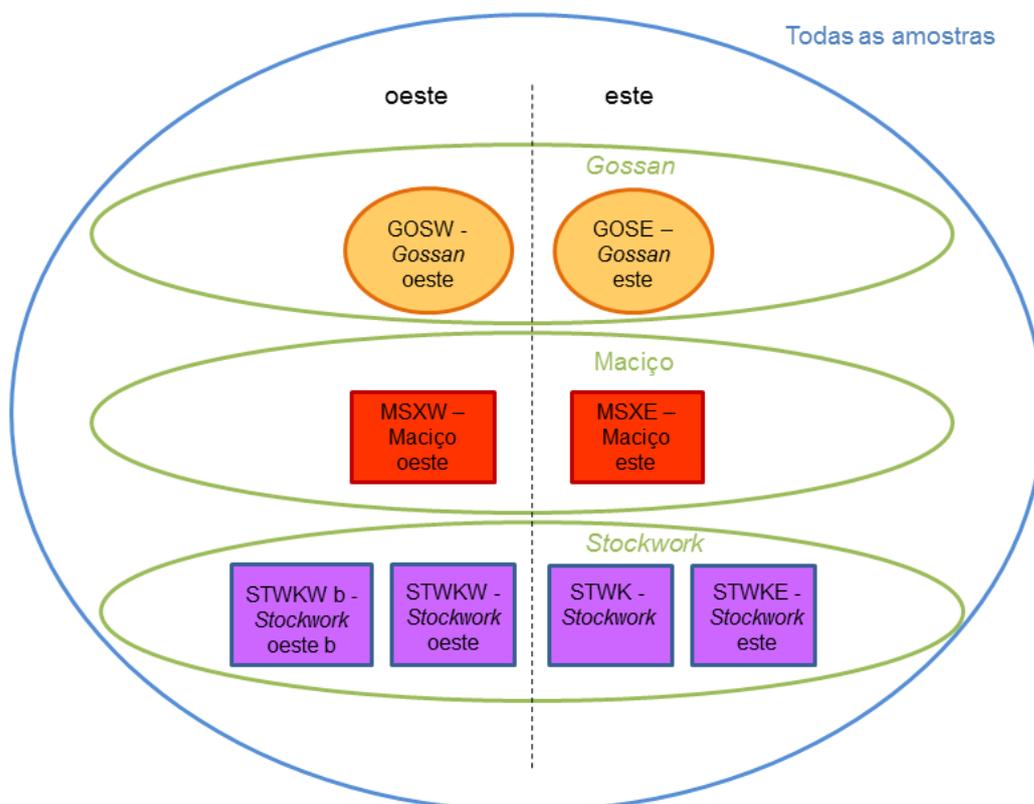


Figura 23 - Representação esquemática das massas geológicas e identificação das zonas mineralizadas – *gossan*, maciço e *stockwork*.

Cada massa de *gossan* forma uma “cobertura” sub-horizontal, de direção principal N20°W, com 20m de espessura, por cima de cada massa de sulfuretos maciços e localmente de *stockwork*. As massas de sulfuretos maciços, também de orientação preferencial N20°W encontram-se sub-verticalizadas, inclinando cerca de 75° para ENE, sendo por vezes envolvidas por *stockwork*. A acompanhar as duas massas de sulfuretos maciços, MSXE e MSXW, encontram-se duas de *stockwork*, STWK e STWKW, respetivamente. Estas, de acordo com as descrições litológicas são caracterizadas principalmente por mineralização disseminada com veios pouco desenvolvidos. A oeste da massa de *stockwork* STWK, foi identificada outra massa de *stockwork*, STWWb. A oeste da falha que controla a mineralização de sulfuretos maciços pelo lado oeste, identificou-se uma quarta massa de *stockwork*, STWKWb, que apresenta uma geometria mais irregular sendo mais distal, apresentando os seus contornos maior incerteza geológica. A separar as massas mineralizadas delinearam-se corpos geológicos de litologias vulcânicas e várias falhas geológicas de direção concomitante com a direção principal dos sulfuretos maciços. As massas de *gossan* e de maciço encontram-se separadas por zonas de falha e afastadas entre 10m a 20m, segundo a direção EW.

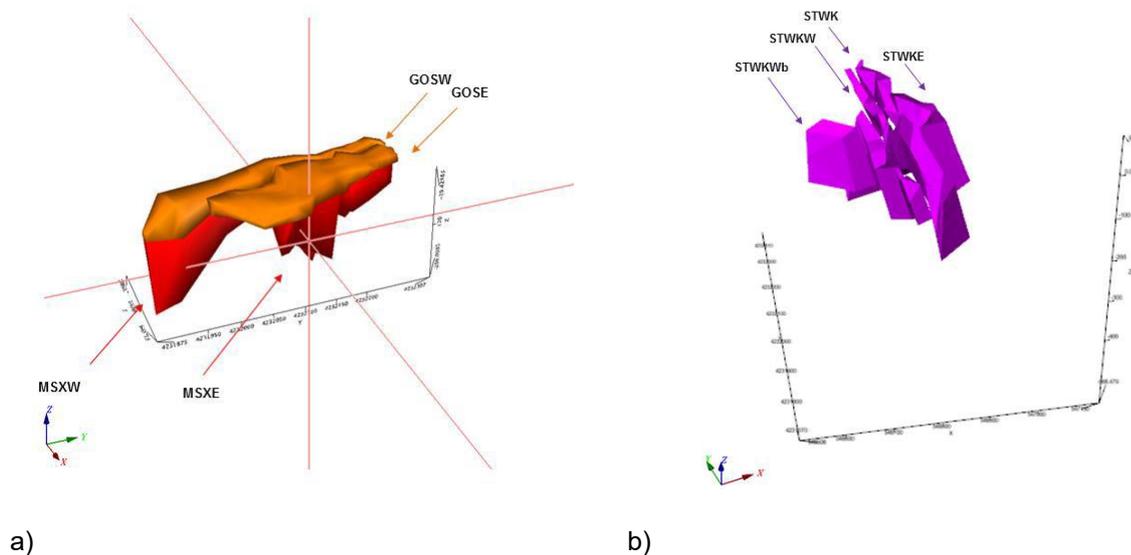


Figura 24 - Gossan e maciço, W e E, vista de este (a). Massas de *stockwork*, vista de sul (b)) (Software:Target) (Folha, 2015).

Estas características de geologia estrutural foram incorporadas no modelo geológico, o que constrange bastante a modelação da mineralização. Na zona de transição entre o maciço e o *gossan* ocorre uma zona de enriquecimento supergénico que foi modelada como *gossan* sendo que, na transição entre o maciço e o *stockwork* adjacente foi por vezes descrito nos *logs* das sondagens zonas semi-maciças e que foram incorporadas no *stockwork*.

Qualquer modelação geológica baseada na informação existente, que é sempre pouca comparativamente a todo o depósito, introduz alguma incerteza derivada do próprio processo de interpretação geológica, nomeadamente quanto à forma e dimensão de cada massa mineralizada, da litologia, da estrutura geológica e do jazigo em si. Quando a confiança é baixa, devido à quantidade de dados ou à variabilidade desta informação dentro do jazigo, e esta é demasiada comparando com

os dados conhecidos, o recurso associado a essa zona do depósito deve ser considerado inferido. As considerações geológicas devem prevalecer sempre sobre qualquer medida de incerteza, segundo Emery, 2006.

O limite entre os tipos de mineralização, para além de descrito litologicamente, é também marcado em termos geoquímicos, embora esta transição seja mais gradual do que a observada na geologia.

O zinco ocorre predominantemente no maciço, apresentando os seus valores uma variação gradual no contacto deste com o *stockwork* e mais abrupta no limite com o *gossan*. A distribuição dos teores de cobre ocorre de um modo mais homogéneo nos vários tipos de mineralização, embora os teores mais elevados ocorram também no maciço. Estas transições de teor do zinco e do cobre podem ser observadas na figura 25 ao longo de duas sondagens, PX03 e PX04A. Os valores mais altos do teor de zinco localizam-se no maciço (PX04A: 11.5%Zn; PX03: 10.25%Zn), havendo uma diminuição gradual mas evidente tanto para o *stockwork* (com máximos de 1.6%Zn no PX04A; e de 1.98%Zn no PX03) como para o *gossan* (com máximos de 0.54%Zn no PX04A; e de 0.55%Zn no PX03) nas duas sondagens. A separação do cobre conforme as tipologias de mineralização é menos marcada. No caso da sondagem PX04A os valores mais elevados encontram-se no *stockwork* (máximo de 4.94%Cu), seguidos pelo *gossan* (máximo de 2.36%Cu) e pelo maciço (máximo de 0.41%Cu). No caso da sondagem PX03 os valores mais elevados de cobre concentram-se no maciço (máximo de 4.46%Cu), no *stockwork* (máximo de 1.01%Cu) e no *gossan* (máximo de 0.13%Cu).

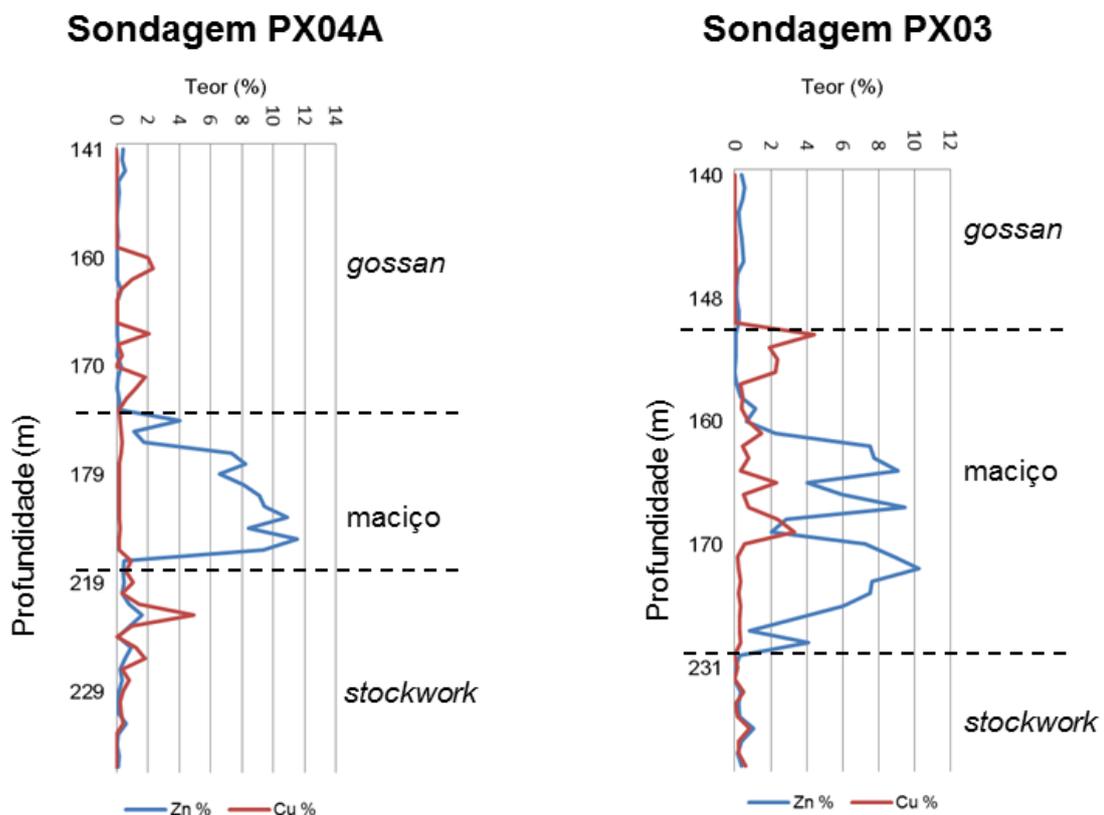


Figura 25 – Relação entre limites de mineralização e teores de zinco e cobre nas sondagens PX04A e PX03.

A base de dados contém informação de 1337 amostras de sondagens carotadas que foram submetidas a análises geoquímicas. Os elementos analisados foram o zinco (Zn), o cobre (Cu), o chumbo (Pb), o ouro (Au), a prata (Ag), e o estanho (Sn), não se encontrando no entanto resultados de todos estes elementos em todas as amostras.

A análise de dados foi feita com os valores amostrados originais tendo-se utilizado o *software* GeoMS1. Os teores dos elementos nas amostras originais foram medidos em 99% das amostras de cobre, zinco e chumbo, em 62% das amostras de ouro, em 11% das amostras de prata e em 27% das amostras de estanho.

As amostras foram agrupadas consoante a localização dentro de cada massa mineralizada, subdividindo-se pelas massas geológicas individualizadas. As massas geológicas foram agrupadas consoante o tipo de mineralização (*gossan*, maciço e *stockwork*), pois a distribuição das amostras pelas respetivas massas é irregular, o que inviabiliza o seu estudo individualizado e, nalguns casos, a prática de variografia.

O número de amostras encontra-se relativamente bem distribuído pelos tipos de mineralização. A mineralização mais amostrada é o maciço, com 531 amostras (40%), seguida pelo *stockwork*, com 530 amostras (40%) e, por último, pelo *gossan* com 265 amostras (20%). Foram estudadas duas variáveis, o teor em zinco e em cobre.

Das 1337 amostras identificaram-se 11 como “não análise” de zinco e cobre. Estas 11 amostras foram retiradas, pois, embora estivessem identificadas como “zeros”, correspondiam a amostras não analisadas para estes elementos nas campanhas de sondagens da REDCORP. Prevalecem, no entanto, 9 amostras de valor “zero” para zinco e cobre, de sondagens mais antigas. Destas, 7 têm resultados de prata e “zeros” nos outros elementos, enquanto que as outras 2 amostras apresentam valor “zero” para todos os elementos. Estas 2 amostras localizam-se, uma numa zona de falha no contacto entre maciço e *stockwork* e a outra imediatamente após o final do maciço onde este apresenta valores baixos de zinco e cobre. Como não foi possível assegurar o significado destes “zeros” optou-se por mantê-las como “zeros”.

4.1.1 Suporte das amostras

A análise do suporte das amostras indica que a dimensão do intervalo médio das amostras em todo o espaço amostrado é de 1.26m, sendo de 1.27m no *gossan*, de 1.13m no maciço e de 1.40m no *stockwork*. A concentração de valores com suporte de 1m é sempre superior a 50%, por isso não se considerou necessário a realização de compósitos. Os gráficos correspondentes à análise bivariada apresentam-se em anexo (Anexo A) onde não se constata correlação entre o suporte e os teores de zinco e de cobre.

Tabela 5 – Suporte das amostras para o *gossan*, *maciço*, *stockwork*, e total.

Tipo de Mineralização	Mínimo	Máximo	Média	Variância	Nº Amostras
GOS	0.45	7.70	1.27	0.52	265
MSX	0.30	5.10	1.13	0.20	531
STWK	0.30	4.15	1.40	0.18	530
Total	0.30	7.70	1.26	0.27	1326

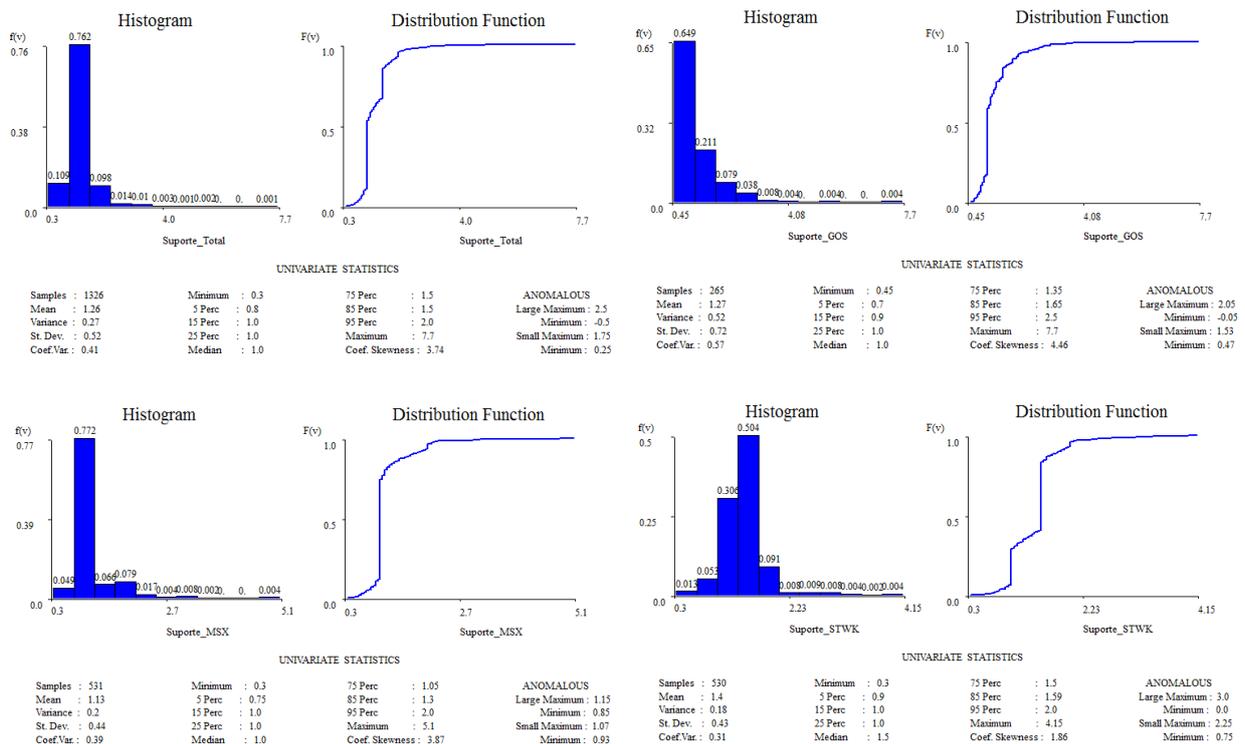


Figura 26 – Histogramas do suporte dos dados originais, totais e subdivididos em *gossan*, *maciço* e *stockwork*.

A distribuição espacial das amostras reflete a distribuição das sondagens que se encontram bem distribuídas pela região em estudo e alinhadas preferencialmente de acordo com a direção principal das massas mineralizadas principais, N20°W, sendo maior a proximidade vertical entre amostras do que a horizontal, o que se reflete na variografia. O espaçamento entre sondagens varia dos 35m aos 100m, sendo a distância média das amostras ao longo da direção N20°W de 50m. Considerou-se o suporte adequado à discretização que se pretende utilizar nos processos de inferência espacial, de 4x4x5 na simulação e 4x4x4 na Krigagem.

Os valores de densidade utilizados são de 3.01t/m³ no *gossan*, de 4.56t/m³ no *maciço* e de 2.82t/m³ no *stockwork*. Estes valores foram retirados do relatório Portex, 2012, e correspondem a valores médios para as diferentes zonas.

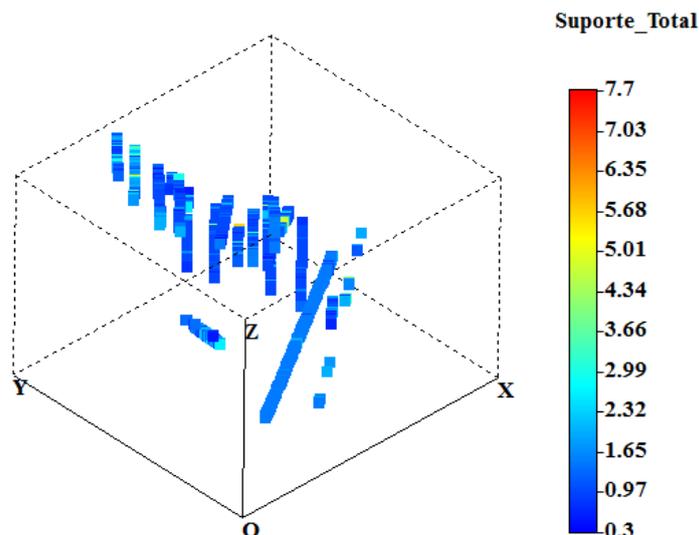


Figura 27 – Distribuição espacial das amostras e seu comprimento (m).

4.1.2 Análise univariada da variável zinco

O teor médio de zinco nos dados é de 1.38%, sendo 0.39% no *gossan*, 2.91% no maciço e 0.33% no *stockwork*, variando entre máximos de 20.19% no maciço e de 2.05% no *gossan*.

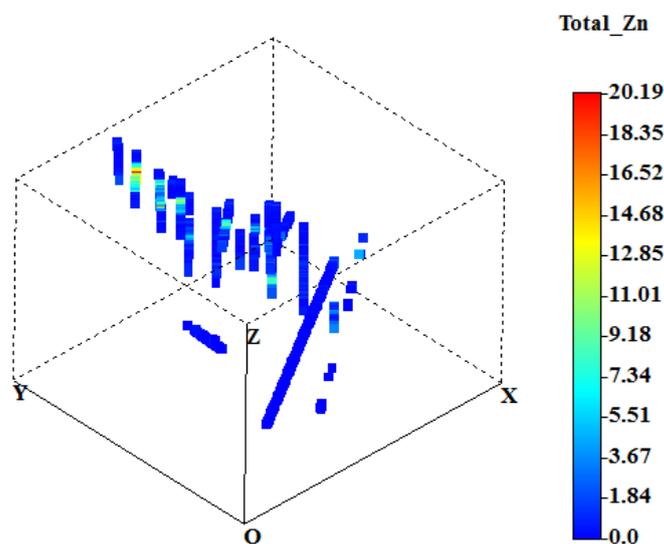


Figura 28 - Distribuição tridimensional dos teores de zinco (%) (GeoMS1).

A distribuição do zinco em toda a mineralização apresenta uma distribuição assimétrica positiva, marcada por uma maior concentração de dados nas primeiras classes, sendo a mediana inferior à média, e com coeficiente de *skewness* positivo, o que é condizente com a marcada cauda de teores elevados, como é observável na tabela 6 e na figura 29.

Tabela 6 - Estatísticos básicos do teor em zinco, para as zonas mineralizadas: *gossan*, *maciço* e *stockwork*.

Teor de zinco (%)										
Tipo de mineralização	Mínimo	Máximo	Média	Variância	NºAmostras	Q1	Q2	Q3	intervalo interquartilico relativo	desvio padrao relativo
GOS	0.026	2.050	0.393	0.154	265	0.12	0.26	0.545	1.635	0.998
MSX	0.000	20.190	2.907	11.116	531	0.365	1.52	4.51	2.727	1.147
STWK	0.000	4.040	0.333	0.285	530	0.01	0.1	0.4275	4.175	1.603

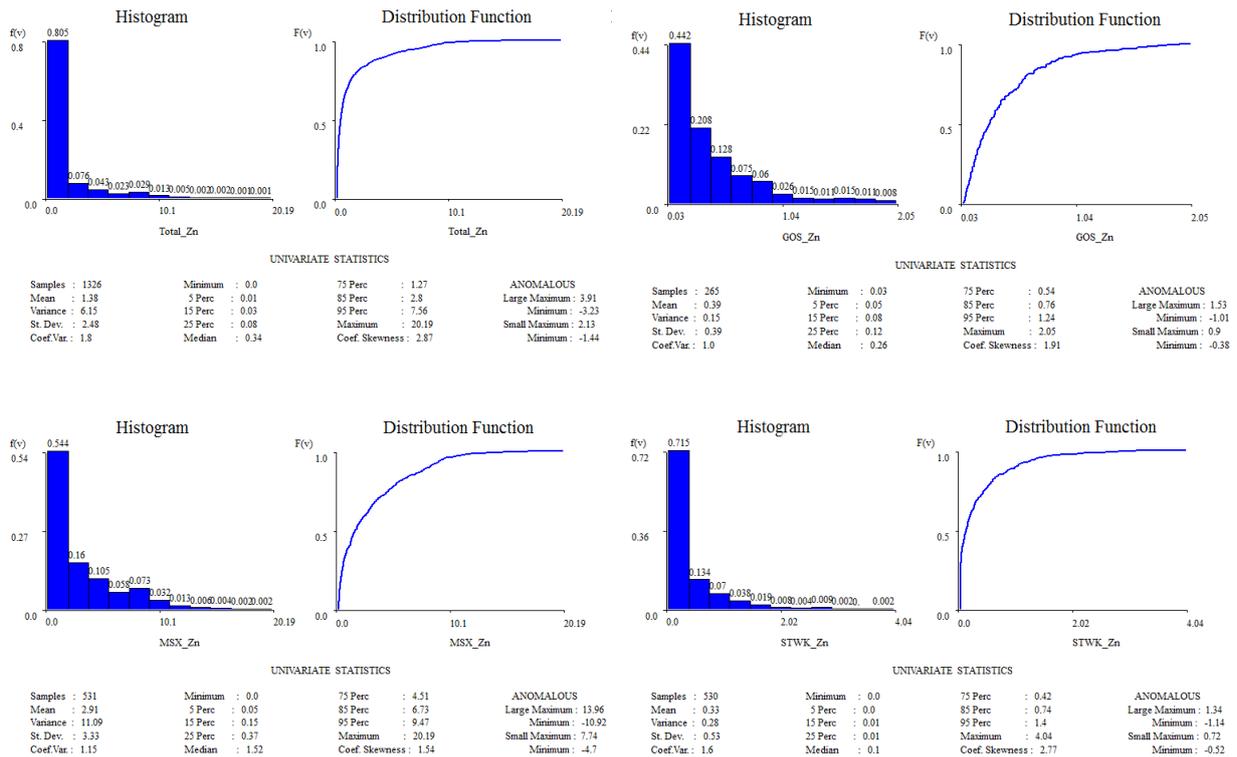


Figura 29 - Histogramas de teor de zinco das amostras. Total, *gossan*, *maciço*, *stockwork*.

Os histogramas do teor de zinco totais e no *maciço* revelam a presença de duas populações distintas de teores de zinco. Estas duas populações estão separadas por uma região de sobreposição, tendo sido considerado como limite entre elas o valor de teor de 5%. Essas duas populações de teores de amostras distintas, uma constituída por valores altos, superiores a 5% e outra composta por valores inferiores, são evidenciadas nas figuras 30 e 31. A população de teor de zinco superior a 5%, constituída por 118 amostras, concentra-se no *maciço*, em ambos os sólidos de MSXE e MSXW. A população de teor de zinco inferior a 5%, constituída por 1208 amostras, encontra-se bem distribuída por todas as massas geológicas amostradas, como é observável nas figuras 30 e 31.

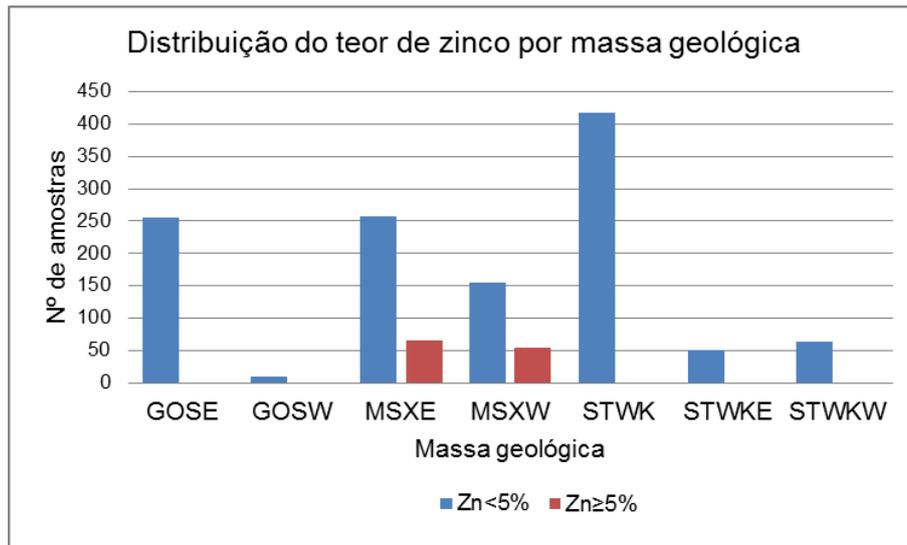


Figura 30 - Distribuição do teor de zinco consoante a massa geológica, separação de populações superior e inferior a 5%.

A população de amostras com teor de zinco superior a 5% encontra-se concentrada na zona centro-norte do jazigo, havendo algumas ocorrências na zona central, como se verifica na figura 31.

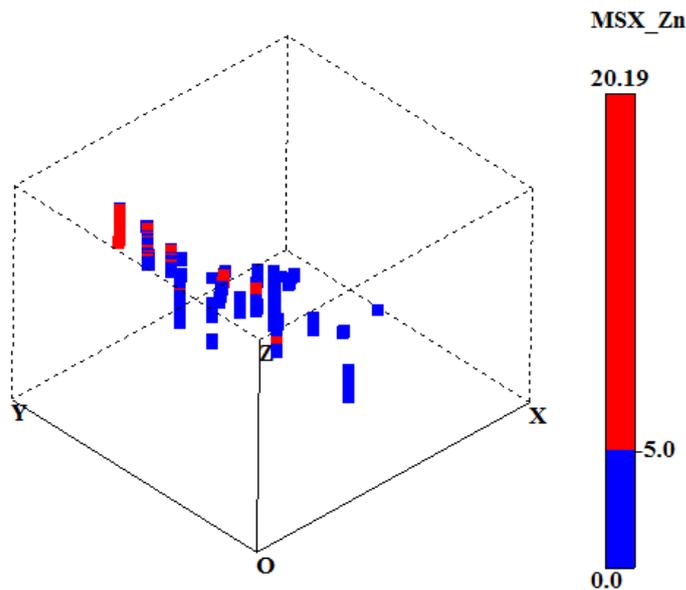


Figura 31 – Projção 3D de teor de zinco (%) em todas as amostras, com valor de separação das 2 populações de 5%.

Esta característica pode estar relacionada com o efeito de *zone refining*, descrito na secção 2.4, que ocorre na formação e concentração destes metais (Gibson, 2007). Este processo metalogenético pode justificar a mais elevada concentração de teores em determinadas zonas do depósito. É de salientar que, neste caso, ocorre em ambas as massas de minério de sulfuretos maciços.

4.1.3 Análise univariada da variável cobre

O cobre apresenta uma distribuição unimodal assimétrica fortemente positiva, sendo o coeficiente de *skewness* maior do que no caso do zinco para todos os tipos de mineralização. No *gossan*, o coeficiente de variação é maior do que nas outras zonas mineralizadas, sendo a distribuição mais assimétrica, encontrando-se 93% dos valores na 1ª classe do histograma, como se pode observar na tabela 7 e figura 32. O intervalo interquartilico relativo é muito superior no *stockwork* devido aos baixos valores de 1º quartil e mediana.

Tabela 7 - Estatísticos básicos do teor em cobre, para as zonas mineralizadas: *gossan*, *maciço* e *stockwork*.

Teor de cobre (%)										
Tipo de mineralização	Mínimo	Máximo	Média	Variância	NºAmostras	Q1	Q2	Q3	intervalo interquartilico relativo	desvio padrao relativo
GOS	0.002	5.940	0.168	0.242	265	0.020	0.050	0.120	2.000	2.920
MSX	0.000	8.400	0.472	0.519	531	0.227	0.320	0.436	0.653	1.524
STWK	0.000	4.940	0.168	0.121	530	0.003	0.014	0.233	16.393	2.069

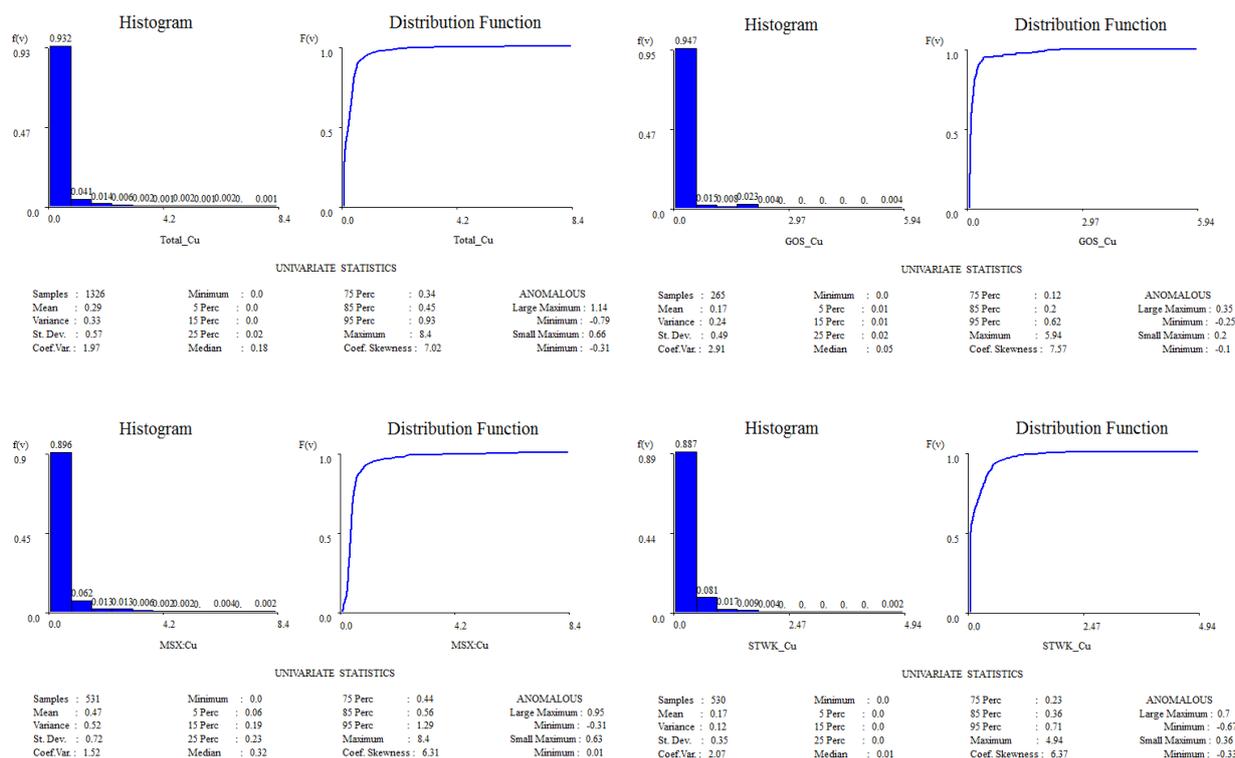


Figura 32 - Histograma da variável cobre, total, *gossan*, *maciço*, *stockwork*.

Os teores de cobre, ao contrário dos de zinco, aparentam estar igualmente distribuídos por todo o depósito.

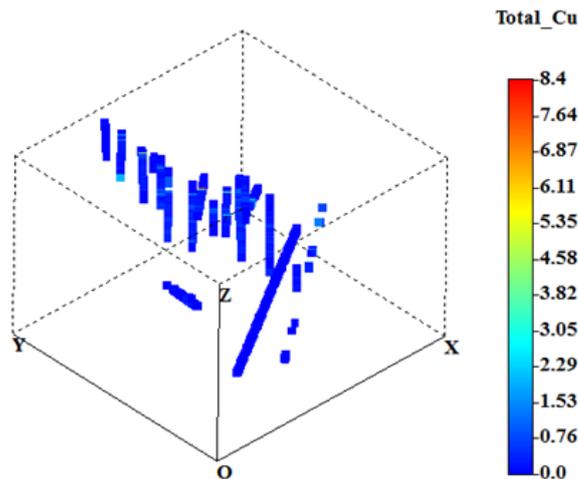


Figura 33 – Projeção tridimensional de teor de cobre (%) em todas as amostras.

4.1.4 Correlação entre as variáveis zinco e cobre

O estudo bivariado pretende averiguar a correlação entre as duas variáveis em estudo, não se identificando correlação neste caso como é observável na figura 34. O coeficiente de Pearson para as amostras nas três zonas é próximo de zero (0.02).

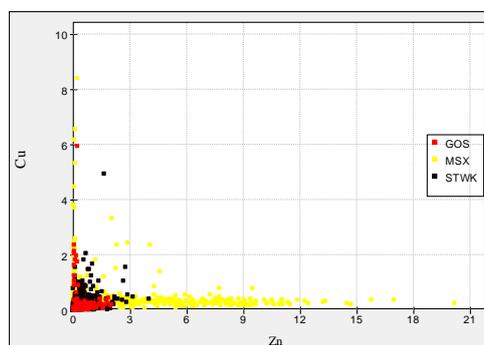


Figura 34 – Correlação entre o teor (%) de zinco e de cobre.

4.2 Definição geométrica do modelo de blocos

A partir do modelo geológico composto pelos 8 sólidos geológicos foi gerado, em *Target* da *Geosoft*, um modelo de blocos que contém no seu interior todos os volumes de sólidos geológicos.

O número de blocos que compõem o modelo ajustado aos sólidos é de 27 blocos (x), 47 (y) e 80 (z) com dimensão de 10m (x), 10m (y) e 5m (z), o que perfaz 101,520 blocos num volume de 50,760,000m³. O *Geosoft* devolve como blocos dentro de cada zona aqueles cujo volume perfaz um total de 40% no interior do sólido. Destes blocos, 1340 são de *gossan*, 1524 de maciço e 7536 de

stockwork. Foram acrescentados os blocos que iam até ao limite da mineralização perfazendo um total de blocos de 1377 de *gossan*, 1638 de maciço e 7564 de *stockwork*. O *gossan* perfaz um volume de 688,500m³, o maciço de 819,000m³, e o *stockwork* de 3,782,000m³. O volume total é de 5,289,500m³. Este foi o volume sobre o qual foi efetuado o cálculo de recursos. Verificou-se que há uma diferença de volume entre o modelo de blocos e o modelo geológico de 2% no *gossan*, 0% no maciço e 3% no *stockwork*.

Aplicou-se uma rotação de 20°, para este, aos eixos coordenados do modelo de blocos para que a orientação do modelo e dos blocos coincida com as direções principais de variografia e com o eixo principal do jazigo. O ponto original foi subtraído às coordenadas de cada bloco do modelo para que a origem fosse (0,0,0) e os trabalhos subsequentes de mais fácil execução.

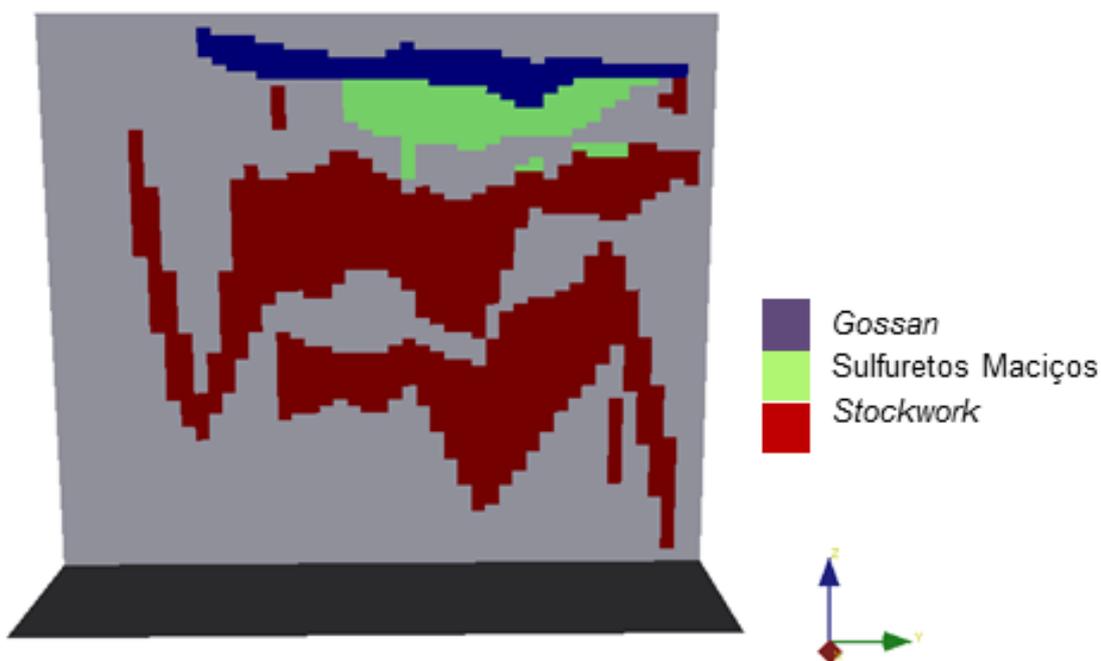


Figura 35 – Zonas, vista de este (SGems).

Tabela 8 – Verificação de diferença de volumes entre modelo geológico e modelo de blocos.

Tipo de Mineralização	Modelo Geológico (m ³)	Modelo de Blocos com blocos adicionados (m ³)	Diferença de volume (%)
GOS	673,959	688,500	-2
MSX	819,864	819,000	0
STWK	3,672,680	3,782,000	3
Total	5,166,503	5,289,500	-2

Foi calculado o teor médio das amostras considerando a média ponderada volumétrica de cada zona mineralizada, tendo em consideração o teor médio das amostras e o volume ocupado por cada zona. Este parâmetro serve para comparar o teor médio da Krigagem e da média das simulações.

$$teor_{(Zn; todas as mineralizações)} = \frac{0.39 * 1377 + 2.91 * 1638 + 0.33 * 7564}{10579} = 0.737\% \quad \text{Eq. 7}$$

$$teor_{(Cu; todas as mineralizações)} = \frac{0.17 * 1377 + 0.47 * 1638 + 0.17 * 7564}{10579} = 0.216\% \quad \text{Eq. 8}$$

4.3 Modelação da dispersão espacial das variáveis selecionadas

Para quantificar a dispersão espacial dos dados fizeram-se várias análises de variografia, sucessivas e iterativas, até serem definidos os variogramas experimentais de melhor ajuste. Os modelos apresentados são os que melhor maximizam a informação disponível que representa a variabilidade espacial do zinco e do cobre. A informação geográfica das amostras, sua quantidade e localização espacial são determinantes neste processo. A estrutura geológica e a metalogénese influenciam grandemente a distribuição dos teores no espaço e a amplitude de variação de teores, contribuindo também para o arranjo das direções de maior e menor continuidade.

O variograma experimental é apresentado como forma de duas ou três direções preferenciais, que melhor representam prováveis anisotropias, e que se considera que melhor reproduzam os padrões espaciais das variáveis. Testaram-se várias direções entre as quais, o variograma vertical ao longo das sondagens, o variograma em várias direções (0,0; 0,45; 0,90; 0,-45) e com vários números de classes de distância, vários modelos, amplitudes e patamares.

Conclui-se que as duas variáveis, zinco e cobre, apresentam anisotropia geométrica com isotropia no plano horizontal em todas as mineralizações, e são caracterizadas pelo variograma da seguinte forma:

- Direção principal: (0,0) direção horizontal. Nota-se que esta coincide com a direção N20W,0° (-20,0), que corresponde à direção de alinhamento longitudinal das massas principais de *gossan*, maciço e *stockwork* e é paralela ao alinhamento das sondagens. É a que apresenta mais sondagens.
- Direção secundária 1: (90,0) direção horizontal. É de salientar que coincide com a direção N70E,0°, correspondente à direção perpendicular das massas principais de *gossan*, maciço e *stockwork*.
- Direção secundária 2: (0,90) direção vertical, que se desenvolve ao longo das sondagens. Direção na qual existe maior quantidade de amostras, e onde o espaçamento entre amostras é menor, com maior número de pares de pontos e amplitudes menores.

De seguida apresentam-se os resultados dos variograma escolhidos com os modelos ajustados, para o zinco e cobre nas amostras de *gossan*, maciço e *stockwork*, respetivamente.

4.3.1 Variografia da variável zinco

Zn_GOS				
Modelo	Patamar	(0,0)	(90,0)	(0,90)
Efeito de pepita	0.03	-	-	-
Esférico	0.123	187	187	13

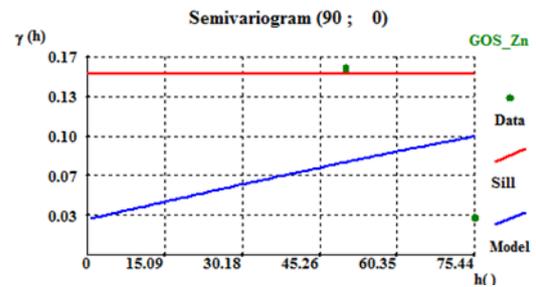
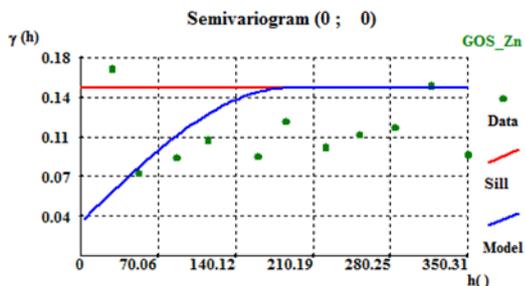
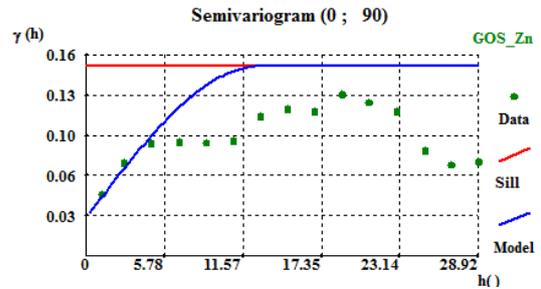


Figura 36 - Variogramas experimentais de teor (%) de zinco, das amostras de *gossan*.

Zn_MSX				
Modelo	Patamar	(0,0)	(90,0)	(0,90)
Efeito de pepita	0.7	-	-	-
Esférico	10.395	120	120	40

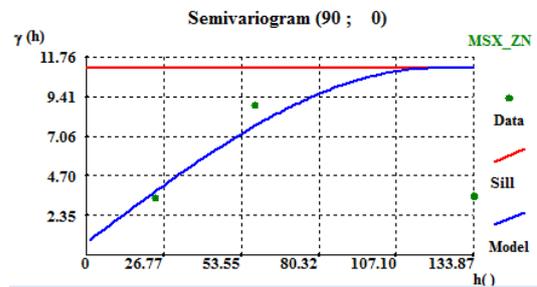
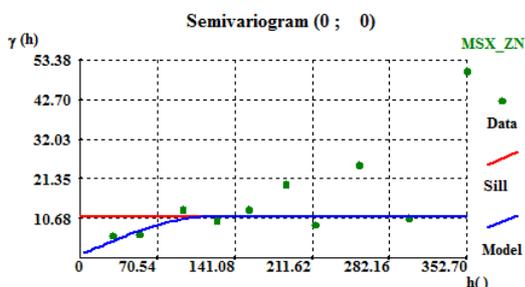
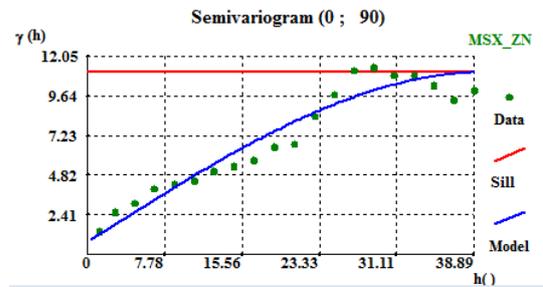


Figura 37 - Variogramas experimentais de teor (%) de zinco, das amostras de maciço.

Zn_Stwk				
Modelo	Patamar	(0,0)	(90,0)	(0,90)
Efeito de pepita	0.05	-	-	-
Esférico	0.235	200	200	14

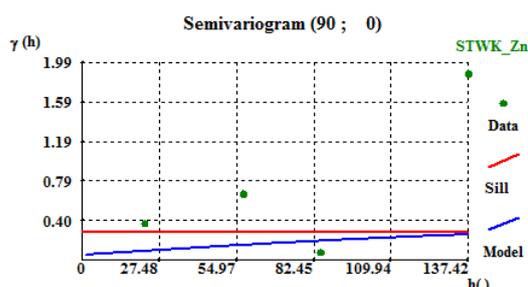
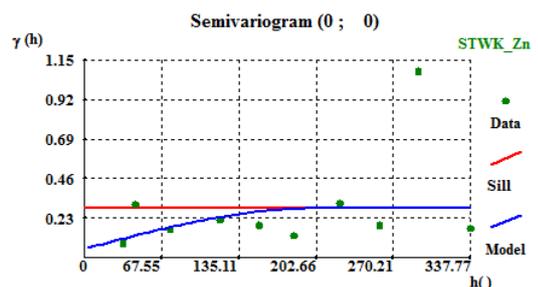
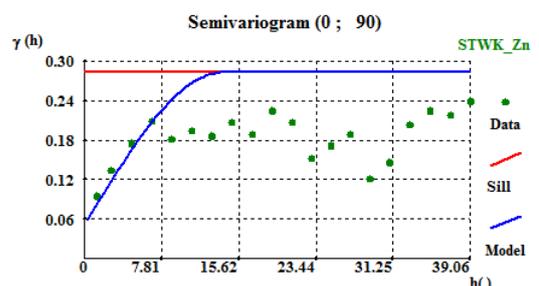


Figura 38 - Variogramas experimentais de teor (%) de zinco, das amostras de stockwork.

O zinco apresenta anisotropia geométrica, sendo isótropo no plano horizontal. Observa-se um efeito de pepita em todos os variogramas experimentais apresentados.

A continuidade do teor de zinco no maciço, medida pelo alcance da estrutura esférica do variograma segundo (0,0), é menor do que no *gossan* e no *stockwork* o que poderá estar relacionado com a distribuição bimodal da variável nesta mineralização, já referida em 4.1.2.

Fazendo a análise dos variogramas de zinco, no *gossan*, maciço e *stockwork*, as amplitudes nas direções principais são de 187m, 120m e 200m. Na direção de menor continuidade o alcance é de 13m, 40m e 14m.

O efeito de pepita é evidente nos variogramas, o que indica um agrupamento de amostras que deverá estar relacionado com a proximidade entre amostras ao longo do eixo das sondagens ou com a variabilidade em pequena escala.

4.3.2 Variografia da variável cobre

A modelação dos teores de cobre foi mais difícil, tendo sido necessário retirar-se três amostras no caso do *gossan* e uma amostra no caso do *stockwork*.

Os variogramas modelados sem essas amostras constituem o Anexo B.

Cu_Gos				
Modelo	Patamar	(0,0)	(90,0)	(0,90)
Efeito de pepita	0.024	-	-	-
Esférico	0.217	85	85	5

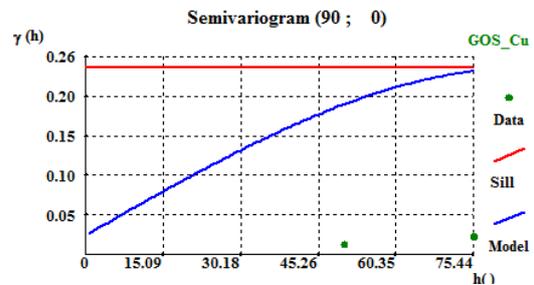
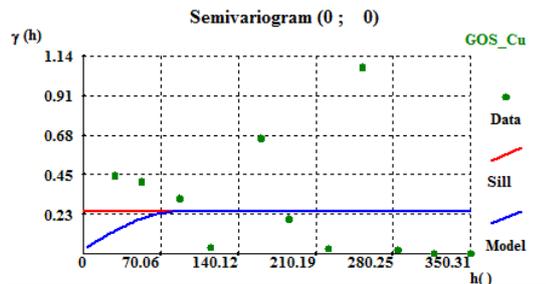
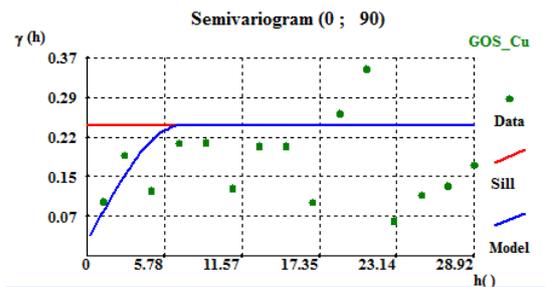


Figura 39 - Variograma experimental de teor (%) de cobre, das amostras de *gossan*.

Cu_Msx				
Modelo	Patamar	(0,0)	(90,0)	(0,90)
Efeito de pepita	0.134	-	-	-
Esférico	0.384	200	200	20

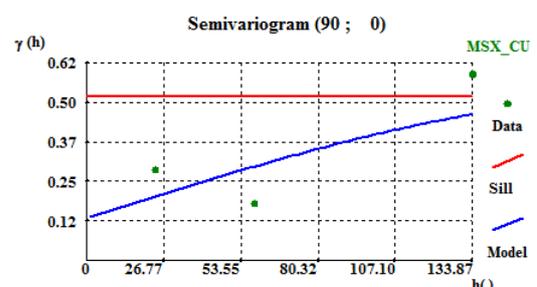
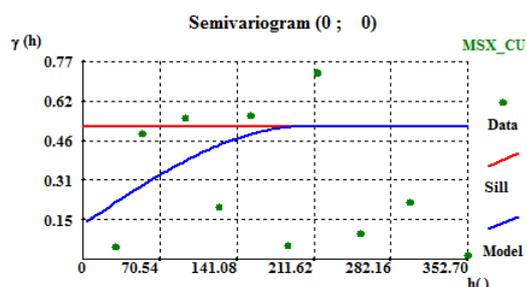
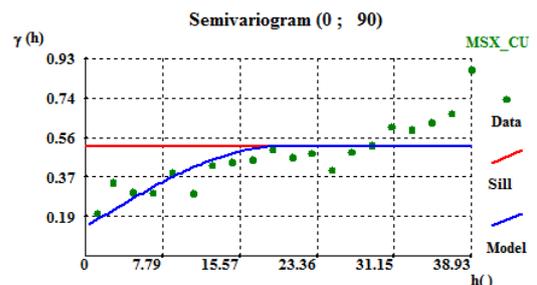


Figura 40 - Variograma experimental de teor (%) de cobre, das amostras de maciço.

Cu_Stwk				
Modelo	Patamar	(0,0)	(90,0)	(0,90)
Efeito de pepita	0.031	-	-	-
Esférico	0.09	97	97	10

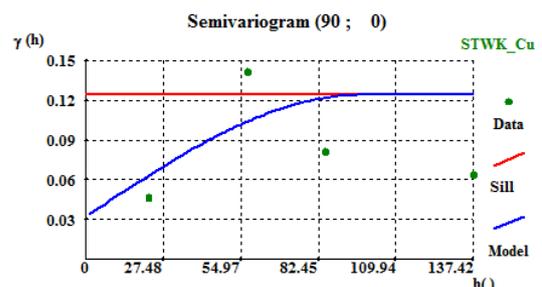
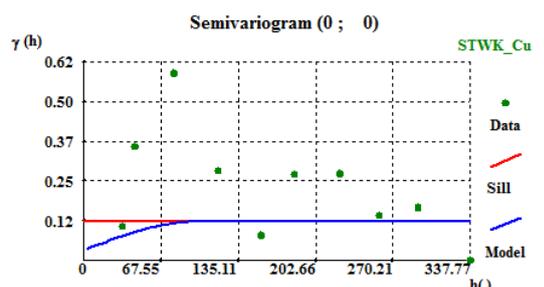
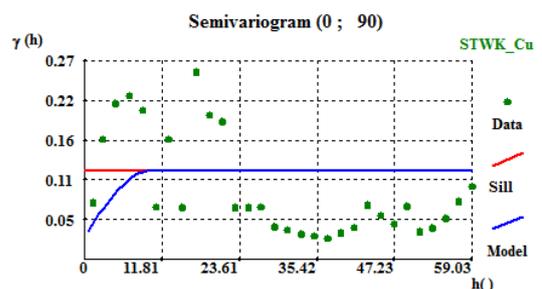


Figura 41 - Variograma experimental de teor (%) de cobre, das amostras de *stockwork*.

A continuidade espacial do teor de cobre apresenta o mesmo tipo de anisotropia observado no zinco, anisotropia geométrica, tendo duas direções com a mesma amplitude, (0,0) e (90,0), e uma perpendicular de menor alcance (0,90).

O alcance dos variogramas de cobre, nas amostras de *gossan* é de 85m na horizontal e de 5m a vertical, no maciço é de 200m, na horizontal e de 20m na vertical e no *stockwork* é de 97m na horizontal e de 10m na vertical.

Os variogramas também apresentam efeito de pepita, o que estará relacionado com a proximidade entre amostras ao longo das sondagens ou com a variabilidade do fenômeno à pequena escala. É de notar que o efeito de pepita no caso do cobre corresponde a uma proporção de 0.1 para 0.9 no *gossan* e de 0.26 para 0.74 no maciço e no *stockwork*.

É de salientar a falta de pontos de variograma na direção (90,0), tanto no zinco como no cobre, o que marca a falta de amostras alinhadas segundo essa direção.

Os parâmetros dos variogramas experimentais foram utilizados nos processos subsequentes de estimação e de simulação.

4.4 Estimação dos teores esperados em cada bloco unitário

Os teores médios, tonelagem e quantidade de metal, de zinco e de cobre, foram estimados por Krigagem normal, recorrendo-se à variografia definida anteriormente nas três zonas mineralizadas, *gossan*, maciço e *stockwork*, do modelo de blocos considerado. Utilizou-se o *software* GeoMS1.

A estimação por Krigagem Normal gera uma inferência espacial fortemente suavizada com os valores estimados muito atenuados em torno da média.

Para a aferição do variograma experimental e na fase de início da estimação recorreu-se ao procedimento de Validação Cruzada que consiste na técnica onde cada amostra é retirada e substituída pelo valor estimado nesse ponto, recorrendo à Krigagem, e onde o “valor médio das diferenças será tão mais próximo de zero quanto melhor for a estimativa” (Andriotti, 2002).

A Krigagem normal foi efetuada no *software* GeoMS1, por três vezes, utilizando-se as informações das amostras e os parâmetros dos variogramas experimentais do *gossan*, maciço e *stockwork* de cada variável de cada vez. Estes resultados foram posteriormente selecionados de modo a integrarem os nós das zonas respectivas da malha de estimação, como descrito na secção 3.

Foram utilizados blocos de 10mx10mx5m com discretização de 4x4x4.

4.4.1 Estimação da variável zinco

Os resultados do processo de estimação por Krigagem normal podem ser observados na figura 42.

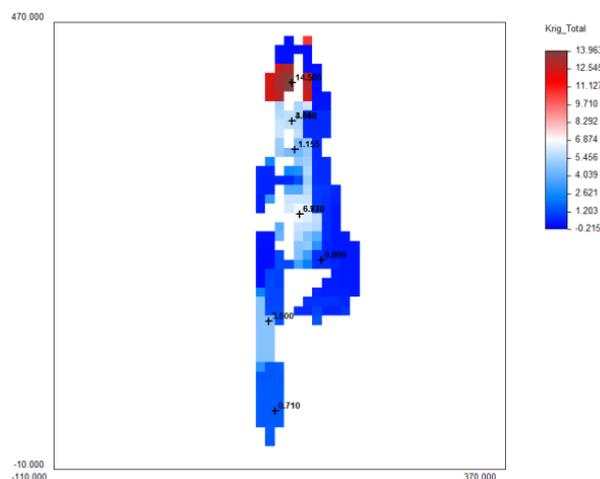


Figura 42 – Resultados da Krigagem normal e teores de zinco das amostras, vista em planta (XOY) (GeoMS1).

Os teores estimados por Krigagem normal reproduzem os valores amostrados, embora com um ligeiro desvio. Os estatísticos dos dados são também reproduzidos, embora haja uma ligeira atenuação em torno da média, com redução do valor máximo e diminuição da variância, o que fecha o histograma como é visível na figura 43.

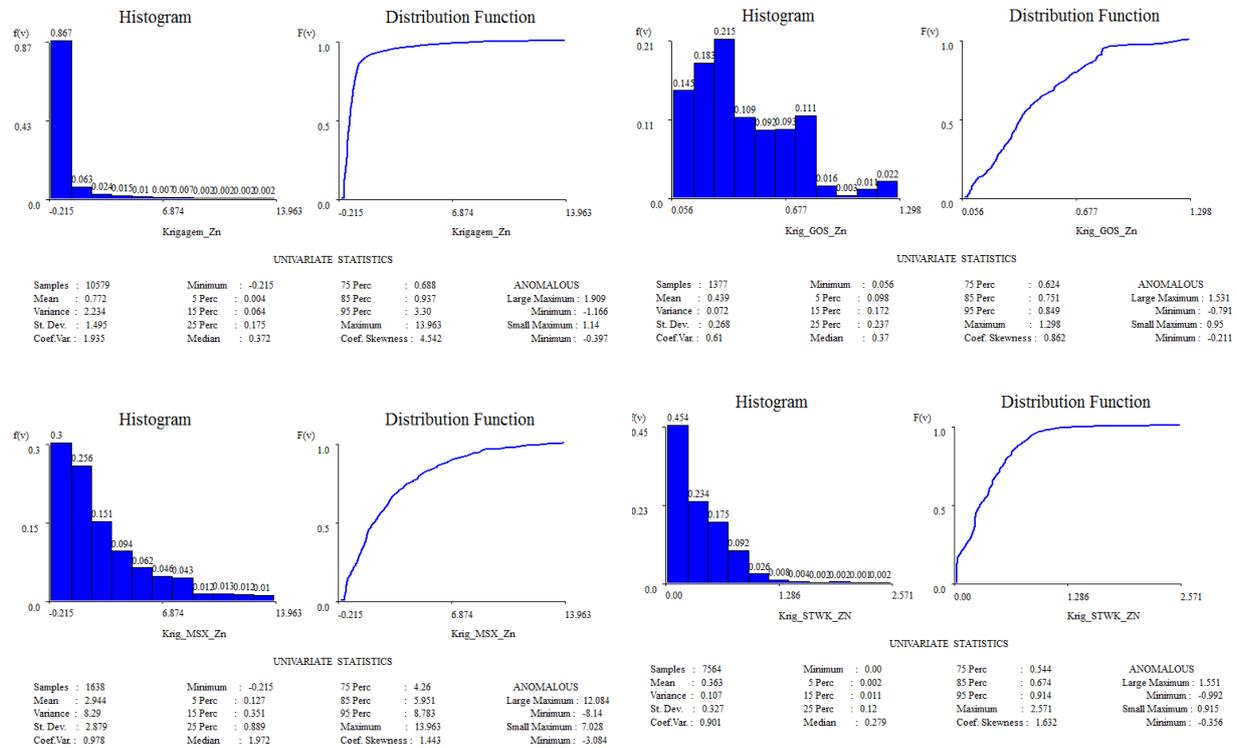


Figura 43 – Histogramas e estatísticos referentes à Krigagem normal no zinco. Total, gossan, maciço, stockwork.

A média da Krigagem é superior em todas as mineralizações, 12% no *gossan*, 1.2% no maciço e 10% no *stockwork*. A variância decresce em relação aos dados em 52% no *gossan*, 25% no maciço e 62% no *stockwork*. O total médio de zinco estimado é de 0.772%, o que é compatível com o valor de 0.737% referente ao teor médio total de zinco volumétrico dos dados, apresentado em 4.2.

O cálculo de recursos resultante do modelo estimado revela uma tonelagem de 16.5 Mt, com um teor de zinco médio de 0,77% e uma quantidade de metal de zinco de 157,723 t. O teor médio de zinco no *gossan* é de 0.44%, no maciço é de 2.94% e no *stockwork* é de 0.36%.

Para um teor de corte de 2%, o recurso apresenta 1.9 Mt com teor médio de 4.97% e quantidade de metal de zinco de 94,641 t.

Os resultados mostram que os teores médios nos sulfuretos maciços são sempre superiores aos do *stockwork* que, por sua vez, são superiores aos do *gossan*, o que respeita a distribuição dos dados amostrados e é concordante com o que se espera de um jazigo desta natureza geológica.

Tabela 9 – Tonelagem (t), teor médio (%) e quantidade de metal (t) de zinco, consoante o teor (%) de corte.

Sem aplicação de teor de corte				Para zn>=2%			
Mineralização	Tonelagem (t)	Teor médio (%)	Q.metal (zn)(t)	Mineralização	Tonelagem (t)	Teor médio (%)	Q.metal (zn)(t)
Gossan	2072385	0.439	9094	Gossan	-	-	-
Maciço	3734640	2.944	109936	Maciço	1858200	5.055	93823
Stockwork	10665240	0.363	38693	Stockwork	36660	2.320	818
Total	16472265	0.772	157723	Total	1894860	4.974	94641

Apesar do teor de zinco no *stockwork* ser inferior ao do maciço, é de notar que a sua contribuição é significativa para a tonelagem final, o que se deve à grande volumetria do *stockwork*. Para teores de corte mais elevados a contribuição do *stockwork* desce significativamente.

4.4.2 Estimação da variável cobre

Os resultados do processo de Krigagem normal do teor de cobre pode ser observado na figura 44.

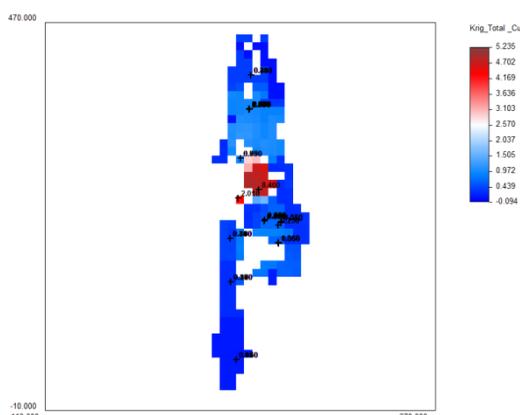


Figura 44 - Resultados da Krigagem normal e teores de cobre das amostras, vista em planta (XOY) (GeoMS1).

Constata-se que os teores estimados por Krigagem normal reproduzem os valores amostrados, embora com um ligeiro desvio, como é observável na figura 44. Os estatísticos dos dados são também reproduzidos, embora haja uma ligeira atenuação em torno da média, com redução do valor máximo e diminuição da variância, o que fecha o histograma como é visível na figura 45.

O teor médio de cobre estimado foi de 0.138% no *gossan*, de 0.308% no maciço e de 0.203% no *stockwork*, sendo sempre superior ao das amostras. O teor médio de cobre em todo o jazigo é de 0.21%, calculado pela média ponderada das três mineralizações. A média da Krigagem é superior nas mineralizações de *gossan* (17%) e de *stockwork* (20%) e inferior no maciço em 34%. A variância decresce em relação aos dados em 86% no *gossan*, 82% no maciço e 25% no *stockwork*.

O teor médio do cobre estimado é de 0.211% sendo comparável com o obtido em 4.2 pela média dos teores dos dados por zona que é de 0.216%.

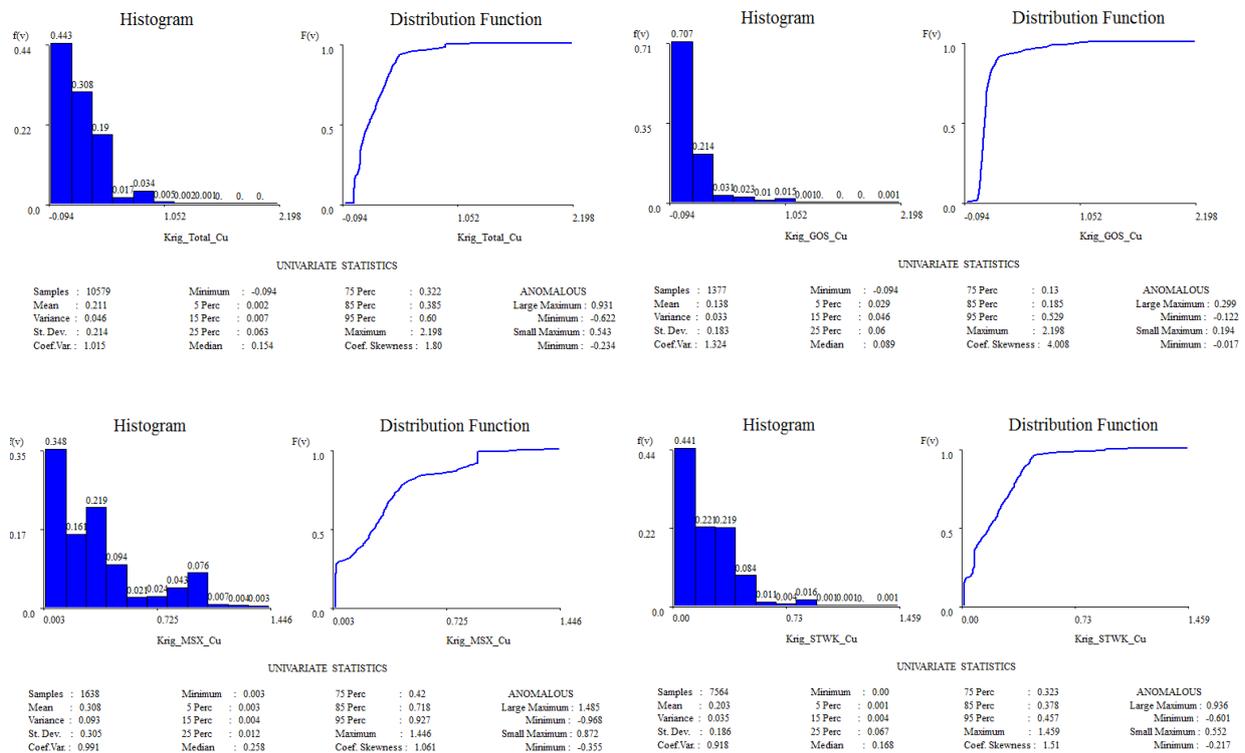


Figura 45 - Histogramas e estatísticos referentes à Krigagem normal no cobre. Total, *gossan*, maciço, *stockwork*.

O jazigo apresenta 16.5Mt com um teor de cobre médio de 0.24% e uma quantidade de metal de 43,022t de cobre.

Com a aplicação de um teor de corte de cobre de 1% o jazigo apresenta 360,855t com 1.343% Cu e 7,502t de cobre. O teor médio de cobre no maciço é superior ao do *stockwork*, que por seu turno, é superior ao do *gossan*.

4.5 Simulação geoestatística da distribuição dos teores em cada bloco unitário

A simulação sequencial direta por zonas, como explicada na secção 3, e descrita em Nunes, et al, 2016, foi realizada tendo por base os dados das amostras das três zonas mineralizadas e a definição dos variogramas experimentais ajustados e definidos previamente em 4.2. Foram gerados 60

cenários equiprováveis para cada variável, com base nos quais se calculou a incerteza espacial. A malha de blocos utilizada foi de 10mx10mx5m com discretização de 4x4x5.

4.5.1 Simulação da variável zinco

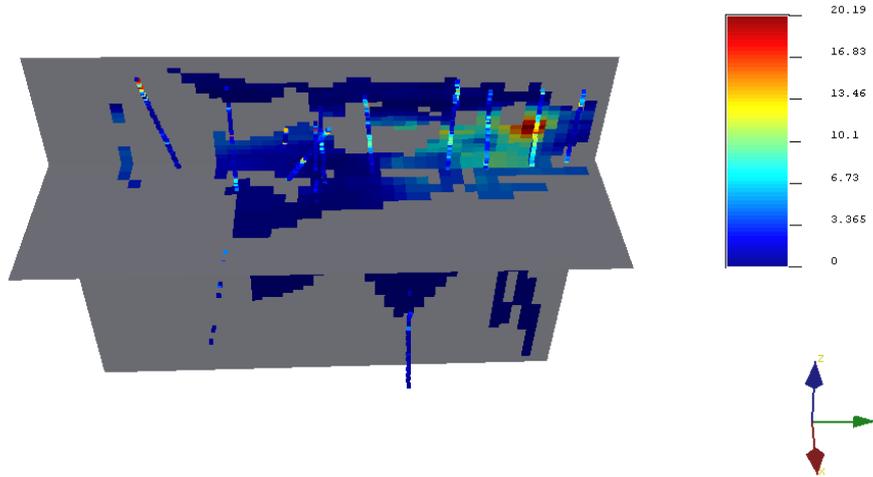


Figura 46 – Simulação (40) valores de zinco.

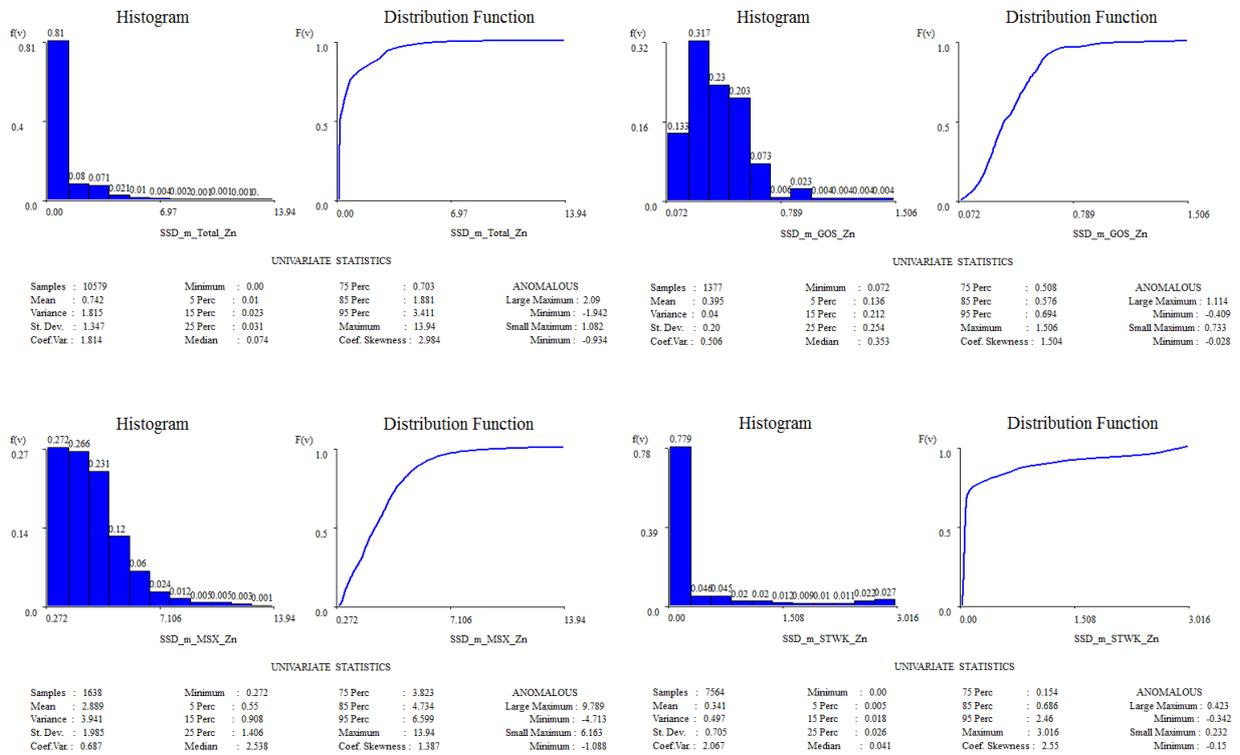


Figura 47 – Histogramas da média do teor (%) de zinco da média das simulações. Total, gossan, maciço e stockwork.

Comparativamente com os dados, a média da simulação, como se pode observar nos histogramas da figura 47, é superior no *gossan* em 1.3%, inferior no maciço em 0.7%, e superior no *stockwork* em 10%. A variância decresce em relação aos dados em 73% no *gossan* e 64% no maciço, aumentando 78% no *stockwork*.

Comparativamente com a Krigagem, a simulação encontra-se subestimada pois a variabilidade dos resultados da média e variância em relação aos dados é menor.

4.5.2 Simulação da variável cobre

De seguida apresentam-se os resultados das simulações de teor de cobre.

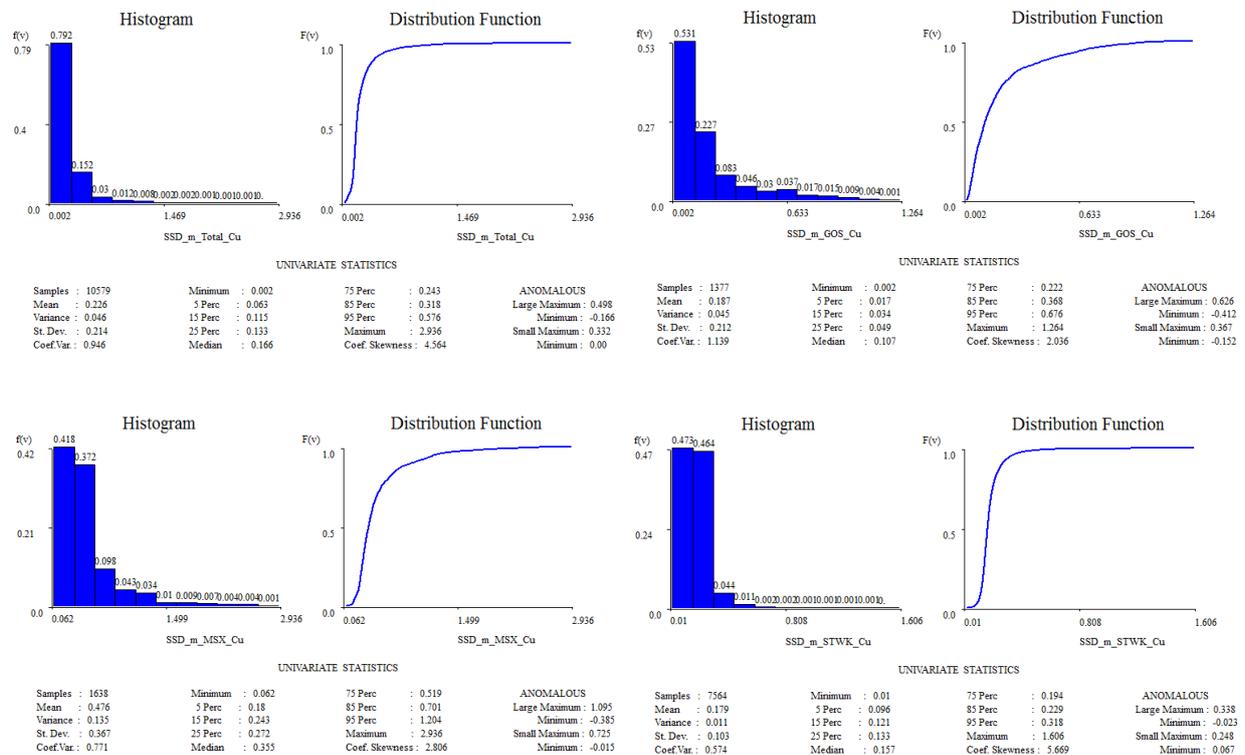


Figura 48 - Histogramas da média do teor (%) de cobre da média das simulações. Total, *gossan*, maciço e *stockwork*.

Comparativamente com os dados, a média das simulações é 11% superior no *gossan*, 34% inferior no maciço e 5.3% superior no *stockwork*. O máximo é 79% inferior no *gossan*, 82% inferior no maciço e 3.3% inferior no *stockwork*. A variância é inferior em 81% no *gossan*, 82% no maciço e 90% no *stockwork*.

4.6 Estimação dos recursos geológicos parametrizados em função de um teor de corte

Nesta secção apresentam-se as funções de recuperação com as curvas de teor médio, tonelagem, e quantidade de metal, de zinco e de cobre, para o *gossan*, o maciço e o *stockwork*, tendo por base os resultados do processo de simulação.

Como os resultados são baseados nas imagens simuladas equiprováveis, apresentam-se sempre as curvas das 60 simulações, a da média das simulações, e a da Krigagem.

4.6.1 Funções de recuperação do zinco

As curvas de recuperação de zinco apresentam inclinações acentuadas o que está relacionado com a distribuição dos teores dos dados amostrados. As curvas resultantes da Krigagem são mais próximas das curvas de simulação no caso do *gossan* e do maciço do que no *stockwork*.

Simulação no *gossan*:

No *gossan*, o teor médio de zinco e a quantidade de metal iniciais calculadas por Krigagem são superiores aos simulados. A forma das curvas é semelhante entre si.

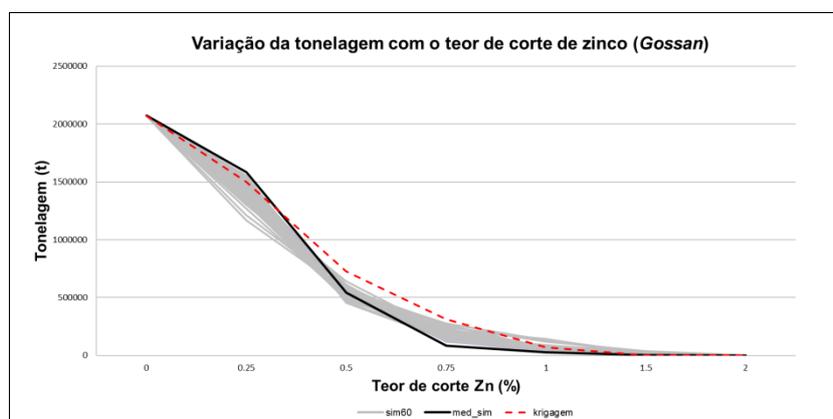


Figura 49 - Variação da tonelagem (t) de zinco com o teor de corte (%), no *gossan*. SSD_zonas e Krigagem.

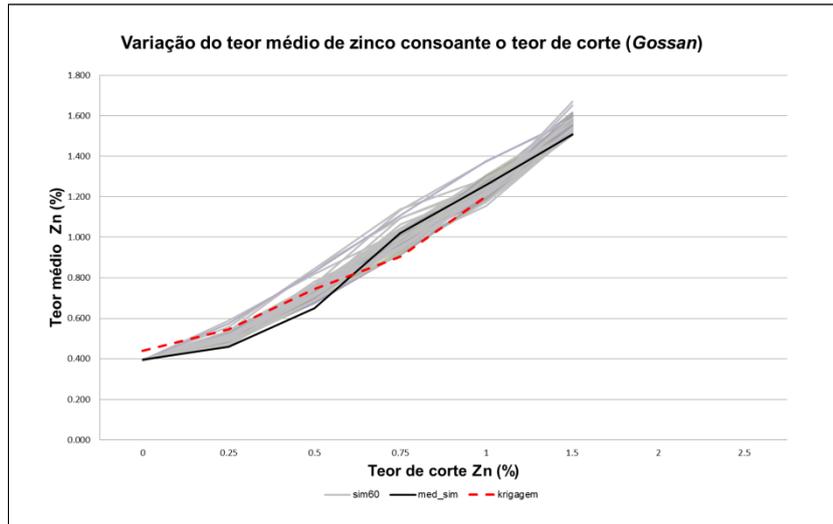


Figura 50 - Variação do teor médio (%) de zinco com o teor de corte (%), no *gossan*. SSD_zonas e Krigagem.

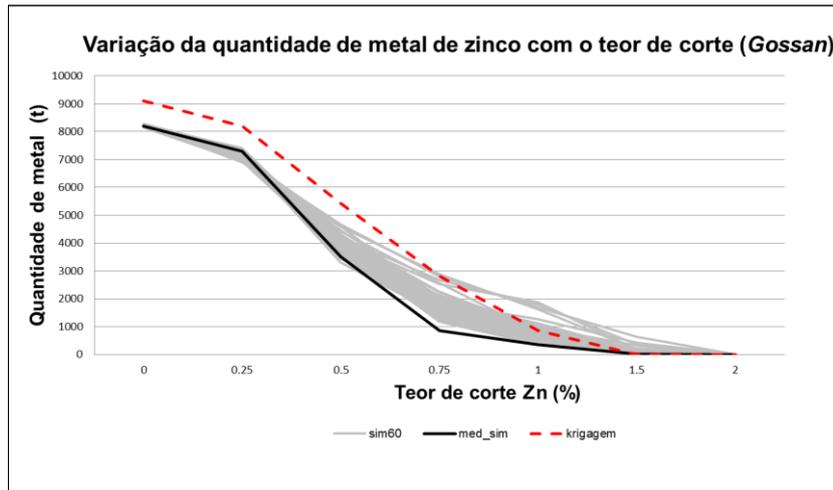


Figura 51 - Variação da quantidade de metal de zinco com o teor de corte, *gossan*. SSD_zonas e Krigagem.

Simulação nos sulfuretos maciços:

Nos sulfuretos maciços, o ponto inicial das curvas de recuperação é mais próximo do que no caso do *gossan*.

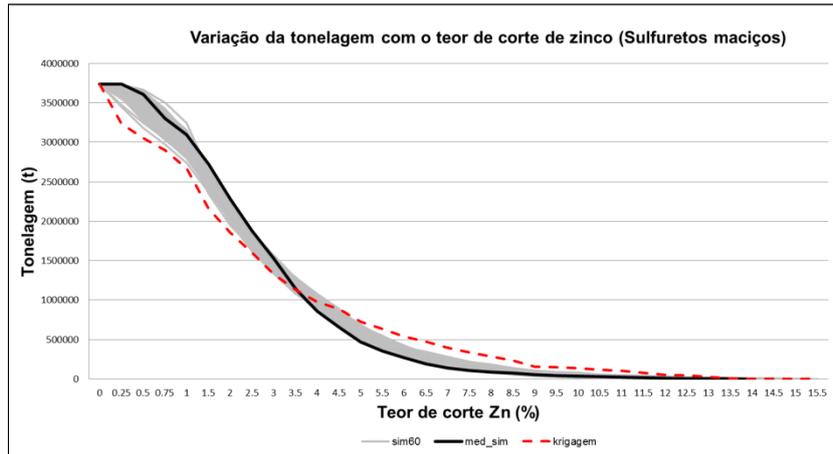


Figura 52 - Variação da tonelagem (t) de zinco com o teor de corte (%), nos sulfuretos maciços. SSD_zonas e Krigagem.

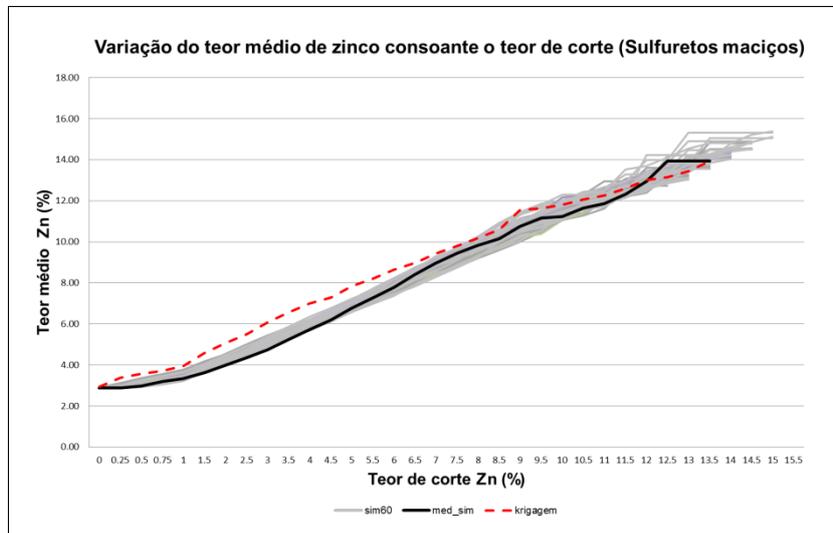


Figura 53 – Variação do teor médio (%) de zinco com o teor de corte (%), nos sulfuretos maciços. SSD_zonas e Krigagem.

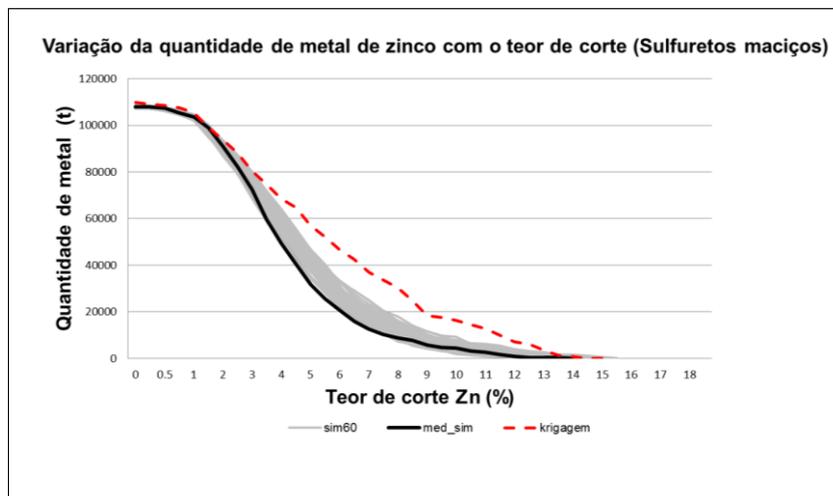


Figura 54 - Variação da quantidade de metal (t) de zinco com o teor de corte (%), nos sulfuretos maciços. SSD_zonas e Krigagem.

Simulação no *stockwork*:

Comparando a média das curvas resultantes das várias simulações com a curva da Krigagem verifica-se que a diferença é maior no *stockwork*. As curvas de teor médio e de quantidade de metal do zinco resultantes da Krigagem são sempre inferiores às da simulação, contrariamente ao observado nas outras mineralizações.

Este desvio entre a curva média simulada e a curva da Krigagem pode-se justificar pelo não desagrupamento dos dados iniciais e pela escolha dos parâmetros de simulação como por exemplo facto de ter sido usada a opção de, quando um nó tem uma amostra próxima, o valor desta amostra é atribuído ao nó. A influência do não desagrupamento dos dados e os parâmetros escolhidos para a simulação podem ter influência também nos resultados apresentados anteriormente.

Verifica-se uma grande quebra de tonelagem para teores de corte a partir de $Zn \geq 0.25\%$, o que pode estar relacionado com o facto de muitos valores perto de zero entrarem para a simulação como valores de dados.

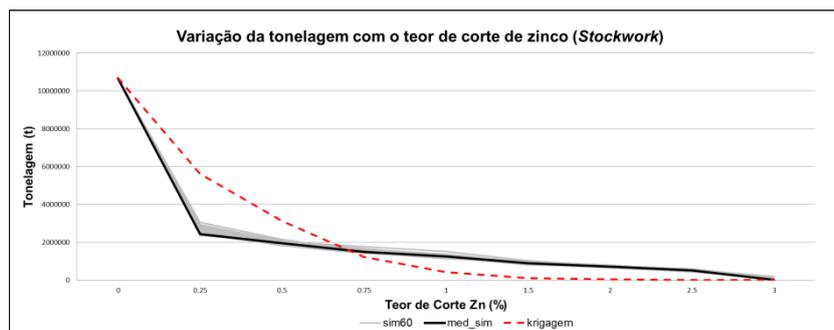


Figura 55 - Variação da tonelagem (t) de zinco com o teor de corte (%), no *stockwork*. SSD_zonas e Krigagem.

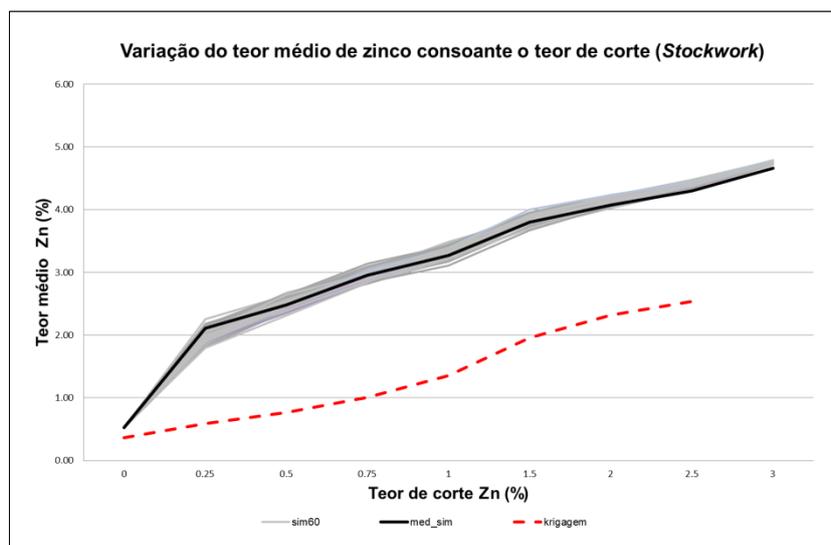


Figura 56 – Variação do teor médio (%) de zinco com o teor de corte (%), no *stockwork*. SSD_zonas e Krigagem.

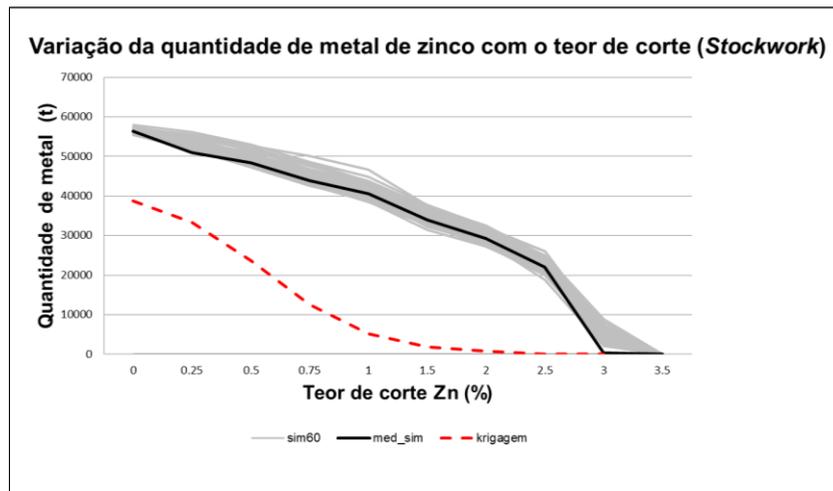


Figura 57 - Variação da quantidade de metal (t) de zinco com o teor de corte (%), no *stockwork*. SSD_zonas e Krigagem.

A figura 58 apresenta a localização tridimensional das amostras e dos valores simulados iguais ou superiores a 0.1% de zinco numa simulação. Deste modo, verifica-se que a influência dos zeros é grande, principalmente na zona média a inferior do *stockwork*. Este facto acontece devido à reduzida quantidade de amostras a grandes profundidades e à grande influência dos seus teores de zinco, muitos próximos de “zero”, que se encontram na base e são distais em relação ao modelo geológico delineado. Uma sugestão seria fazer um modelo de zonas para o *stockwork*, provavelmente separando em duas zonas, uma de sulfuretos semi-maciços e com a presença de veios mais próxima do maciço e com teores superiores, e outra inferior de sulfuretos disseminados ou mesmo desconhecidos.

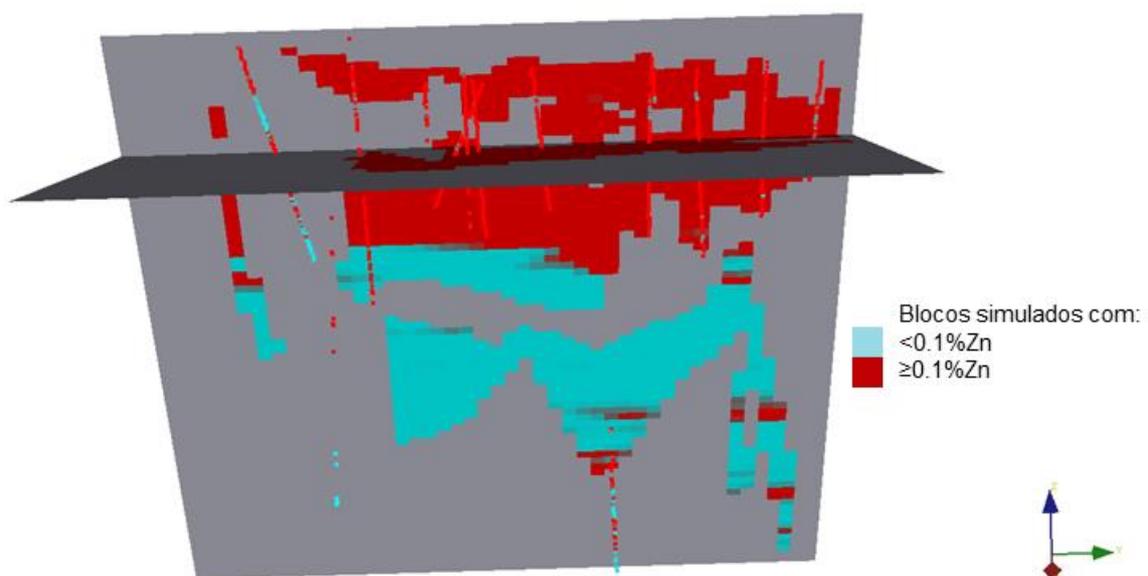


Figura 58 – Separação dos blocos com teor de zinco simulado superior e inferior a 0.1% (Simulação nº 23).

Outra sugestão para delimitar logo de início a zona de melhores teores do *stockwork* seria a realização de um modelo geoquímico interior ao geológico, que restringisse as zonas de maior teor, provavelmente superior a 0.1% de zinco. Esta variabilidade reflete-se nas curvas de função de recuperação.

4.6.2 Funções de recuperação do cobre

As funções de recuperação do cobre, para a tonelagem e quantidade de metal, apresentam um decréscimo acentuado, enquanto que as curvas de variação de teor médio com o teor de corte sobe acentuadamente, o que reflete a função de distribuição de teores nos dados. Também no caso do cobre ocorre um desvio entre as curvas simuladas, a curva média destas e a curva de Krigagem, o que se pode justificar pelo não desagrupamento dos dados iniciais e pela escolha dos parâmetros de simulação como facto de ter sido usada a opção de atribuir o valor de amostra mais próxima ao nó.

Simulação no *gossan*:

No caso do *gossan* a variabilidade das várias curvas simuladas, de teor médio e de quantidade de metal, é superior à do zinco.

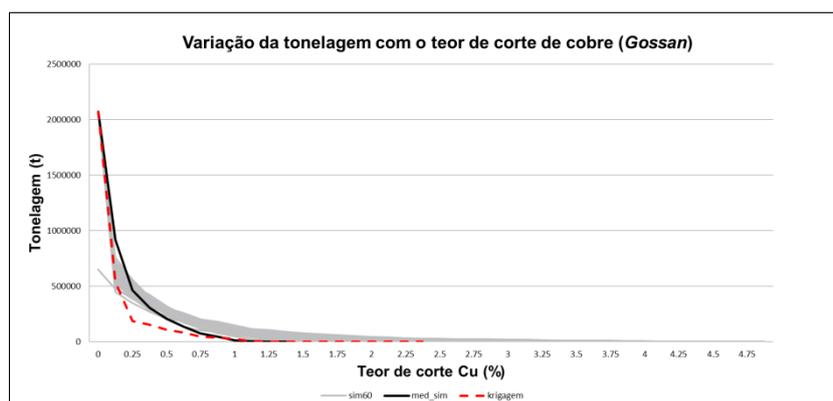


Figura 59 - Variação da tonelagem (t) de cobre com o teor de corte (%), no *gossan*. Resultado da SSD_zonas.

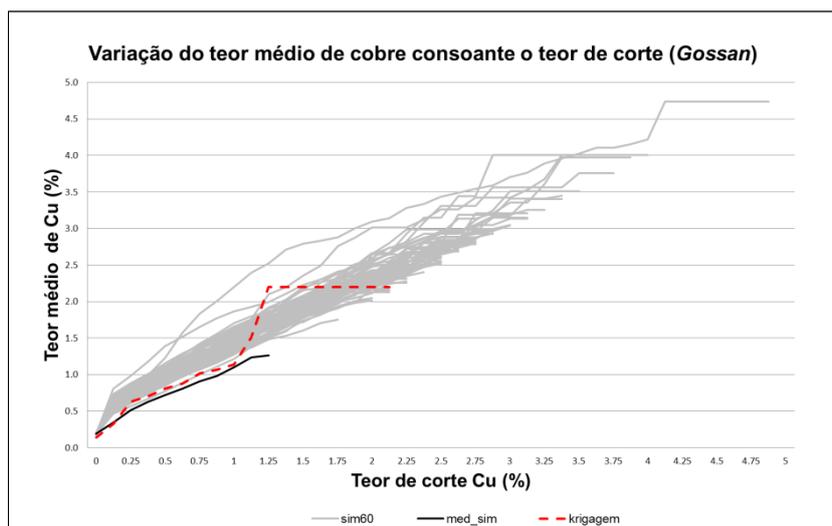


Figura 60 - Variação do teor médio (%) de cobre com o teor de corte (%), no *gossan*. Resultado da SSD_zonas.

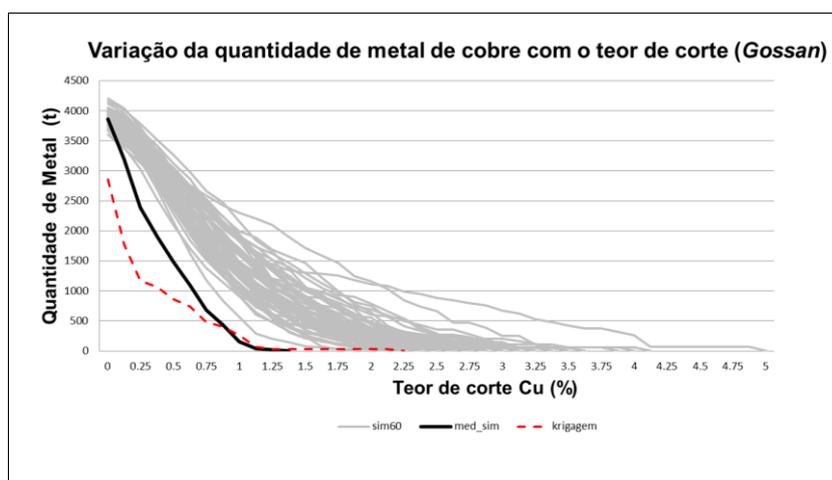


Figura 61 - Variação da quantidade de metal (t) de cobre com o teor de corte (%), no *gossan*. Resultado da SSD_zonas.

Simulação nos sulfuretos maciços:

Na simulação de cobre dos sulfuretos maciços as curvas de simulação aproximam-se mais da curva de simulação média do que no *gossan*. No entanto, as curvas de teor médio e de quantidade de metal da Krigagem são sempre inferiores às das simulações.

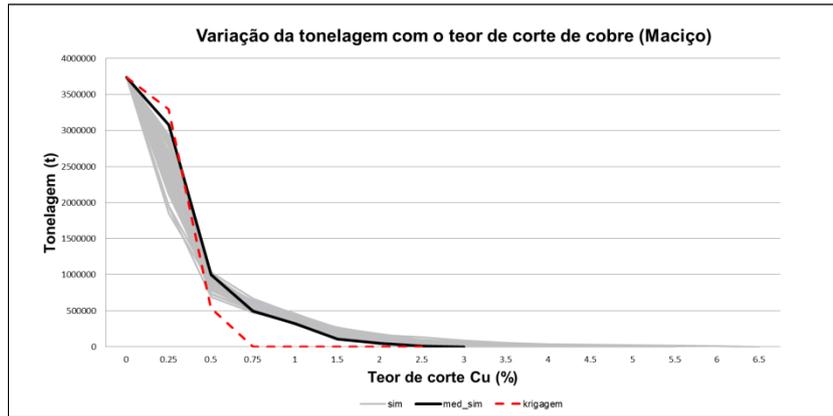


Figura 62 - Varição da tonelagem (t) de cobre com o teor de corte (%), nos sulfuretos maciços. Resultado da SSD_zonas.

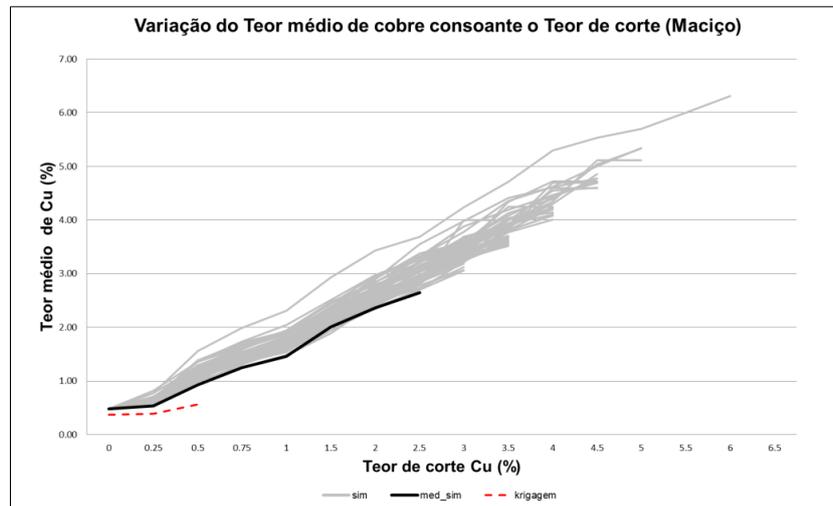


Figura 63 - Varição do teor médio (%) de cobre com o teor de corte (%), nos sulfuretos maciços. Resultado da SSD_zonas.

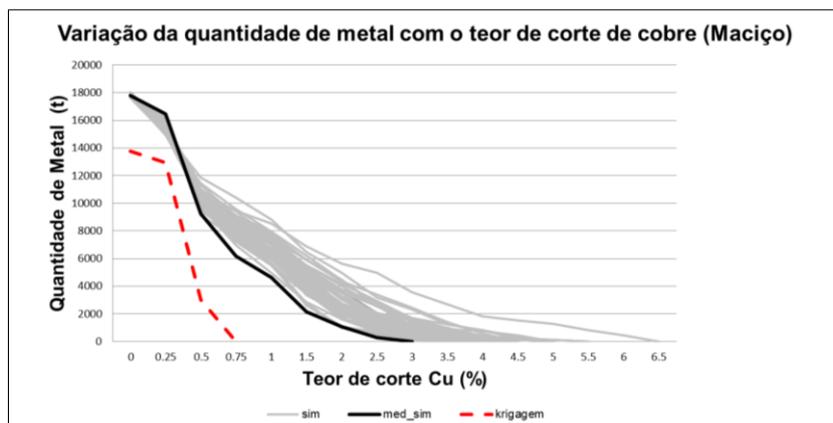


Figura 64 - Varição da quantidade de metal (t) de cobre com o teor de corte (%), nos sulfuretos maciços. Resultado da SSD_zonas.

Simulação no *stockwork*:

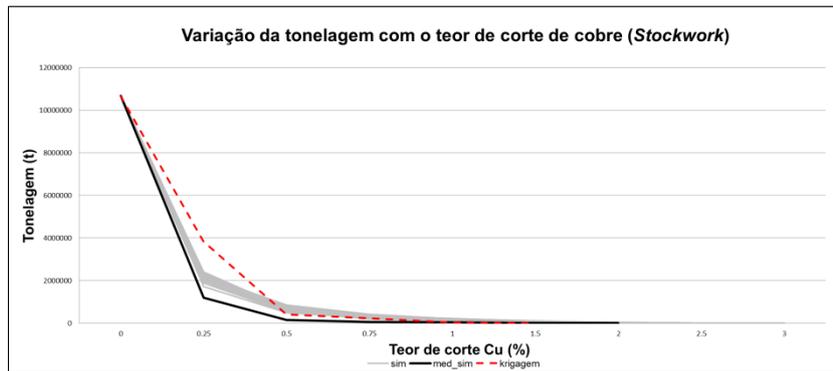


Figura 65 - Variação da tonelagem (t) de cobre com o teor de corte (%), no *stockwork*. Resultado da SSD_zonas.

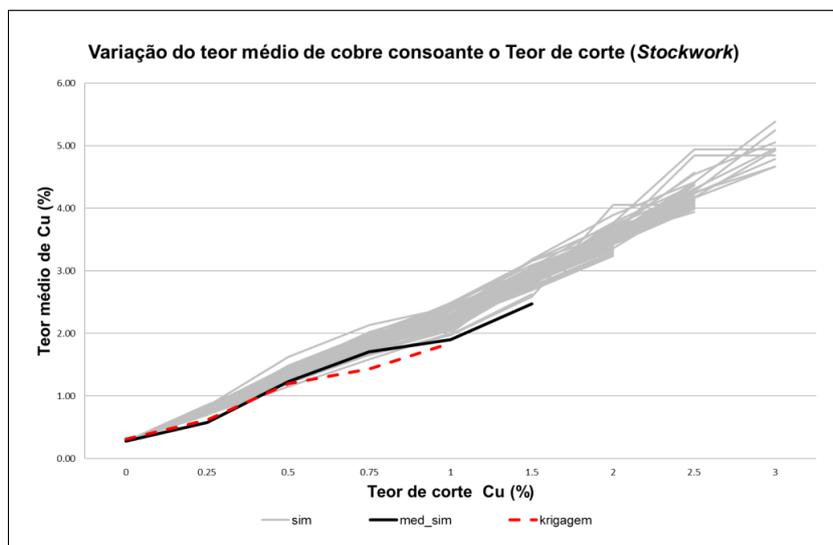


Figura 66 - Variação do teor médio (%) de cobre com o teor de corte (%), no *stockwork*. Resultado da SSD_zonas.

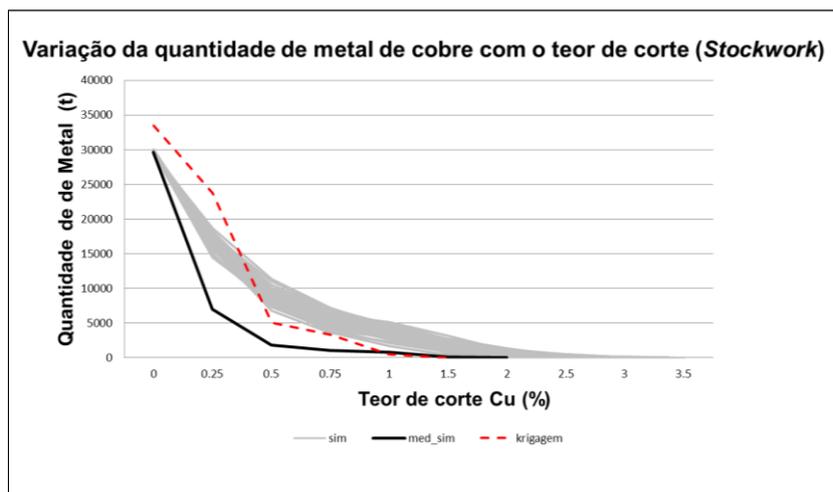


Figura 67 - Variação da quantidade de metal (t) de cobre com o teor de corte (%), no *stockwork*. Resultado da SSD_zonas.

4.6.3 Classificação de recursos com base na incerteza

A classificação de recursos usada neste trabalho baseia-se na quantificação da incerteza. O parâmetro utilizado como base para a medição da incerteza neste trabalho foi a % de intervalo interquartilício relativo (IIR) em cada zona relativamente aos valores para cada bloco:

$$\text{intervalo interquartilício relativo} = \frac{Q_3 - Q_1}{Q_2} \quad \text{Eq. 9}$$

O intervalo interquartilício relativo é um parâmetro estatístico que considera a diferença entre os terceiro (Q_3) e primeiro quartis (Q_1) em relação à mediana (Q_2), sendo uma boa medida estatística para aferir a amplitude de valores mais prováveis. Deste modo, quanto maior, maior a variabilidade de valores em cada bloco, e portanto, menor a confiança no valor atribuído ao bloco.

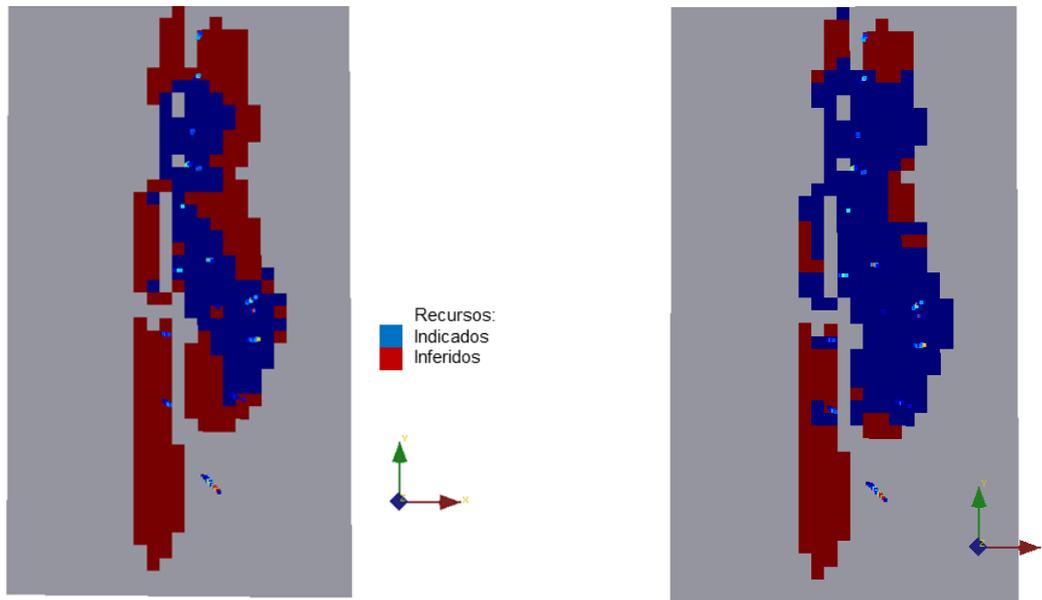
4.6.3.1 – Recursos de zinco

O valor de intervalo interquartilício relativo para o zinco no *gossan* varia entre 0.03 e 0.51, e no maciço entre 0.057 e 1.583. No *stockwork* considerou-se que os blocos cuja mediana é inferior a 0.03%Zn, teriam valores demasiado elevados de incerteza e não deveriam ser considerados recurso, pois não há confiança na sua estimacão. Estes 5253 blocos, correspondentes a 7.4Mt, são mineralizacão potencial não sendo reportados como recurso.

Constatou-se que estes blocos se concentravam em zonas mais profundas e afastados de sondagens. Desde modo, o recurso estimado fica reduzido a 8.96Mt com teor médio de zinco de 1.68% e quantidade de metal de zinco de 150,400t. Compararam-se vários cenários de incerteza, de 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35% e 40% de intervalo interquartilício relativo, como se pode observar na figura 68. (No Anexo C e D encontram-se as tabelas com vários níveis de incerteza, para tonelagem, teor médio e quantidade de metal de zinco, sem aplicacão de teor de corte e com teor de corte de zinco $\geq 2\%$)

Os recursos de zinco foram separados considerando-se 35% de incerteza, utilizando-se a referéncia de aproximadamente $\pm 30\%$ de incerteza de Rossi et Deutsch (2014), em recursos indicados com 6.4Mt, teor médio de zinco de 1.35% e 100,830t de quantidade de metal de zinco e recursos inferidos com 2.5Mt com teor médio de zinco de 2.53% e 49,555t de quantidade de metal de zinco. A zona de menor variabilidade por bloco, logo de maior certeza, e portanto onde se concentra o recurso indicado

de zinco encontra-se distribuída pelas três mineralizações, na zona centro, centro-norte e este do jazigo, como se pode observar na figura 69, para uma incerteza de 35%.



a) Recursos com 25% incerteza (IIR) (360m) b) Recursos com 35% incerteza (IIR) (360m)

Figura 68 – Separação de recursos com base na incerteza (25% e 35%).

Para um teor de corte de 2% a tonelagem do recurso é de 3.55Mt com um teor médio de zinco de 2.66% e 94,452 t de quantidade de metal de zinco. Para uma incerteza de 35%, o recurso indicado é de 2.056Mt com um teor médio de zinco de 2.63% e quantidade de metal de zinco de 63,509t. Os recursos inferidos são constituídos por 1.49Mt com teor médio de 3.97% e 49,812t.

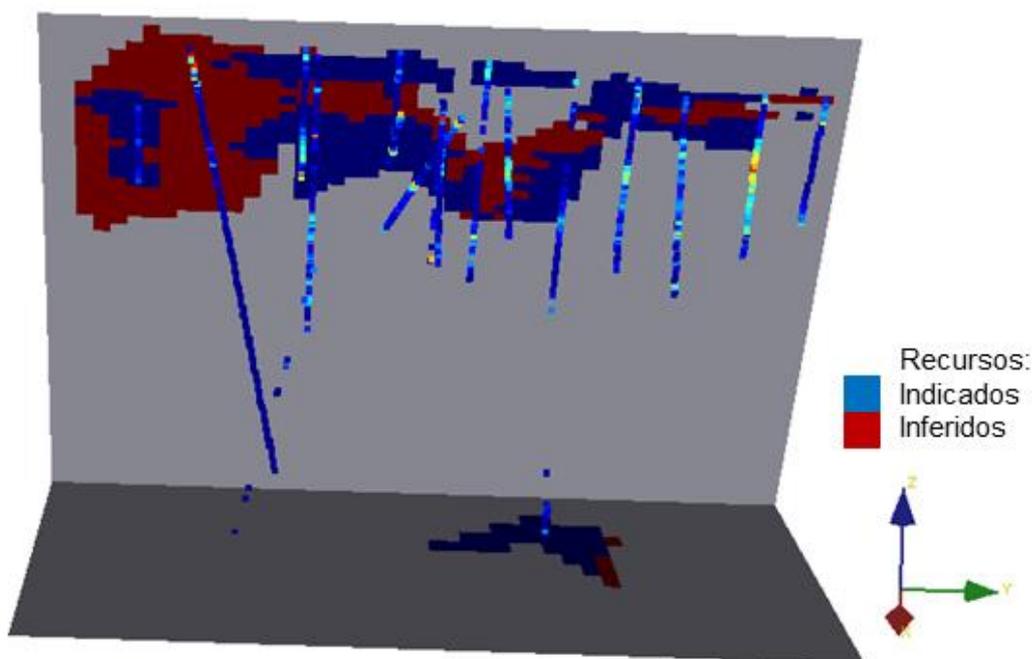


Figura 69 – Recurso indicado e inferido de zinco - 35% de incerteza (SGems).

4.6.3.2 – Recursos de cobre

Os recursos de cobre encontram-se com teores mais equilibrados em todo o jazigo o que se reflete na sua simulação. No entanto, os teores com maior incerteza concentram-se no *gossan* e no *stockwork* relativamente aos do maciço. Aplicando o mesmo método ao cobre que se aplicou ao zinco, um corte aos blocos com valor mínimo de mediana das zonas onde esta não é zero, neste caso o maciço, ($Q_2=0.043$), foram retirados 96 blocos de *stockwork* e 987 blocos de *gossan*. Estes perfazem uma tonelagem de 1.4Mt de mineralização potencial de cobre. A tonelagem de recursos de cobre é de 14.8Mt com um teor médio de 0.27% de cobre e quantidade de metal de cobre de 39,447t. O teor médio de cobre para os recursos indicados, é de 0.33%, sendo em cada zona de 0.458% no *gossan*, 0.456% no maciço e 0.225% no *stockwork*. A tonelagem é de 541,800t, 1,988,100t, 4,235,640t e a quantidade de metal de cobre de 2,395t, 15,317t e 7,638t respetivamente. O teor médio dos recursos inferidos é 0.19% de cobre, sendo 0.263% no *gossan*, 0.604% no maciço e de 0.151% no *stockwork*, sendo a tonelagem correspondente de 46,655t, 321,480t, 6,294,240t e a quantidade de metal de cobre de 206t, 2,476t, 11,413t, respetivamente. Com a aplicação de um teor de corte de 1% de cobre, os recursos passam a 373,635t com 1.42% de teor médio de cobre e 5,306t de quantidade de metal de cobre. Os recursos indicados são constituídos por 318,915t com teor médio de 1.46% e quantidade de metal de 4,508t de cobre. Os recursos inferidos são constituídos por 54,720t com teor médio de 1.46% e quantidade de metal de cobre de 798t. (No Anexo E e F encontram-se as tabelas com vários níveis de incerteza, para tonelagem, teor médio e quantidade de metal de cobre, sem aplicação de teor de corte e com teor de corte de cobre $\geq 1\%$.)

5 Conclusões e Trabalho Futuro

5.1 Conclusões Gerais

Esta dissertação tem como principal objetivo a classificação dos recursos minerais existentes no sector noroeste do depósito da Lagoa Salgada, na Faixa Piritosa Ibérica, consoante a quantificação da incerteza. Este depósito é um jazigo de sulfuretos maciços vulcanogénicos polimetálicos que ocorre no lado português da Faixa Piritosa Ibérica, com um sector central com mineralização conhecida disseminada e de *stockwork* e um sector noroeste alvo deste trabalho. Neste sector ocorrem três tipos principais de mineralização, *gossan*, maciço e *stockwork*, que se encontram sob 130m de sedimentos terciários da Bacia do Sado. Em termos geológicos é fortemente falhado, dobrado e encontra-se verticalizado.

Concluiu-se que este jazigo necessita de mais sondagens, dada a sua variabilidade geológica e de mineralização, o espaçamento entre sondagens e amostras e a variabilidade dos resultados obtidos.

A incerteza foi quantificada para cada bloco, através da variabilidade dos resultados gerados por simulação sequencial direta por zonas, e medida através do intervalo interquartilico relativo. Este método respeita a distribuição dos teores, os estatísticos básicos e o padrão de continuidade estrutural dos teores dos dados permitindo a geração de vários cenários equiprováveis.

A variabilidade, medida pelo intervalo interquartilico relativo, permitiu a classificação de recursos entre indicados e inferidos tendo sido estudadas variações de 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35% e 40%. Concluiu-se que uma boa separação dos recursos seria na ordem de grandeza dos 35%, o que indicia também a pouca densidade de informação e a necessidade de uma malha de sondagens mais apertada. Estas trariam maior confiança ao cálculo de recursos.

É de salientar que os recursos calculados pela simulação apresentam um desvio em relação aos estimados por Krigagem, em termos de tonelagem, teor médio e quantidade de metal. Este desvio entre as curvas simuladas e de Krigagem pode-se justificar pela opção de não desagrupamento dos dados e pelos parâmetros de simulação escolhidos.

Os recursos de zinco obtidos foram de 8.96Mt com teor médio de zinco de 1.68% e 150,400t, que foram separados em recursos indicados com 6.4Mt, teor médio de zinco de 1.35% e 100,830t de quantidade de metal de zinco e recursos inferidos de 2.5Mt com teor médio de zinco de 2.53% e 49,555t de quantidade de metal de zinco. O estudo apresenta 7.4Mt de mineralização potencial de zinco.

Os recursos calculados, quando submetidos, a um teor de corte de zinco de 2% apresentam 3.5Mt de recurso com um teor médio de 2.66 e quantidade de metal de zinco de 94,452t. Para uma incerteza

de 35% os recursos indicados são de 2.056Mt com um teor médio de zinco de 2.63% e quantidade de metal de zinco de 63,509t. Os recursos inferidos são constituídos por 1.49Mt com teor médio de 3.97% e 49,812t.

A tonelagem de recursos de cobre é de 14.8Mt com um teor médio de cobre de 0.27% e quantidade de metal de cobre de 39,447t. O teor médio de cobre para os recursos indicados em cada zona, individualmente, é de 0.458% no *gossan*, 0.456% no maciço e 0.225% no *stockwork*. A tonelagem é de 541,800t, 1,988,100t, 4,235,640t e a quantidade de metal de cobre de 2,395t, 15,317t e 7,638t respectivamente. O teor médio dos recursos inferidos é de 0.263% no *gossan*, 0.604% no maciço e de 0.151% no *stockwork*, sendo a tonelagem correspondente de 46,655t, 321,480t, 6,294,240t e a quantidade de metal de cobre de 206t, 2476t, 11,413t, respectivamente. O estudo apresenta 1.4Mt de mineralização potencial de cobre.

Com a aplicação de um teor de corte de 1% de cobre, os recursos passam a 373,635t com 1.42% de teor médio de cobre e 5,306t de quantidade de metal de cobre. Os recursos indicados são constituídos por 318,915t, com teor médio de 1.46% e quantidade de metal de 4,508t de cobre. Os recursos inferidos são constituídos por 54,720t, com teor médio de 1.46% e quantidade de metal de cobre de 798t.

A problemática da quantificação de incerteza aplicada ao cálculo de recursos de um jazigo mineral continua a ser uma questão premente dado o avanço que possibilita à indústria mineira na ótica da otimização dos processos. Verifica-se uma tendência de automatização em muitos dos passos de classificação de recursos. As vantagens associadas a este processo são o menor tempo requerido, a garantia de repetibilidade dos processos, maior transparência, menor erro, *update* mais frequente. As desvantagens são a dificuldade de identificar erros no processo, desenvolvimento de modelos que não são geologicamente coerentes com a realidade que leve a uma falsa sensação de confiança nos cálculos (Rossi et Deutsch, 2014).

5.2 Trabalho Futuro

Na sequência desta dissertação propõem-se como trabalhos futuros várias abordagens à classificação de recursos no sector noroeste do jazigo da Lagoa Salgada, na Faixa Piritosa Ibérica, como o estudo da incerteza associada a outros elementos e o estudo mais detalhado de eventuais recursos medidos. O estudo da separação de *stockwork*, em semi-maciço e zona disseminada, seria um passo importante para aferir uma definição de zonas mas correta.

Também no caso do cobre ocorre um desvio entre as curvas simuladas, a curva média das simulações e a curva de Krigagem o que se pode justificar pelo não desagrupamento dos dados iniciais e pela escolha dos parâmetros de simulação, como a utilização da opção de nos casos em que as amostras estão próximas de nós, o valor de teor da amostra mais próxima ser atribuído ao nó. Sugere-se portanto o desagrupamento dos dados e a afinação dos parâmetros de simulação, iniciando pelos modos de procura.

Propõe-se a realização de mais sondagens de modo a aumentar o conhecimento do sector noroeste do jazigo da Lagoa Salgada, e verificar a sua extensão para este, sul e em profundidade e, possibilidade de estudo da influência das falhas geológicas que o separam da zona central. Propõe-se a realização de uma análise mais detalhada da continuidade de teor na zona de zinco superior a 5% dentro do sector noroeste da Lagoa Salgada, aferir a sua distribuição espacial, investigar se a incerteza nessa zona é maior ou menor do que no resto do jazigo. Averiguar a possível correlação espacial entre o zinco e o índio.

Constatou-se que a zona com os teores mais elevados, embora se situe na área centro e norte das duas massas de maciço, oeste e este, aparenta uma orientação preferencial oblíqua à do alinhamento preferencial destas massas mineralizadas. O estudo de dispersão espacial desta população poderá ter importantes consequências nos trabalhos futuros de delimitação de teor. Propõe-se o uso de outras abordagens geoestatísticas com estudo de incerteza associado, como a co-simulação sequencial direta por zonas para avaliar o potencial polimetálico do jazigo e integrar a variabilidade espacial e a correlação com os outros elementos analisados, nomeadamente, chumbo, ouro, prata e estanho. Sugerem-se técnicas de co-simulação entre classificação geológica e classificação de teor e eventual integração da informação geofísica neste estudo. Como continuação deste trabalho, propõe-se o estudo dos outros elementos de chumbo, ouro, prata e estanho e cálculo de reservas do sector noroeste do jazigo da Lagoa Salgada com introdução de parâmetros tecnológicos e económicos. A variabilidade aferida nesta classificação pode ser utilizada no cálculo de reservas, medindo-se também a incerteza das reservas e delimitando um intervalo de possibilidades de cenários tecnológicos e económicos que considerem essa variabilidade.

Estudar mais aprofundadamente a influência dos zeros, readaptando o modelo geológico a cortes sucessivos dos valores para evidenciar as zonas mais ricas do jazigo.

Referências Bibliográficas

- Andriotti, J. L. S., 2002. Notas de Geoestatística. Acta Geologica Leopoldensia, XXV(55): pg -3-14
- Barrie, C. T.; Amelin, Y.; Pascual, E., 2002. U-Pb Geochronology of VMS mineralization in the Iberian Pyrite Belt @ Mineralium Deposita 37, Springer-Verlag, pg-684-703
- Brown, T.J, Wrighton, C.E, Idoine, N.E, Raycraft, E.R, Shaw, R. A., Deady, E.A., Rippingale, J, Bide, T ,2016. World Mineral Production pg-2010-2014, British Geological Survey
- Catarino, B. M. P., 2009. Modelação tridimensional de uma jazida mineral prospectada por sondagens e objectivando a sua exploração a céu aberto. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Geológica e de Minas. IST
- CIM definition standards - For Mineral Resources and Mineral Reserves, 2010. @ National Instrument 43-101: Standards of disclosure for Mineral Projects (NI 43-101)
- Darling, P., 2011. SME - Mining engineering handbook. Society for Mining, Metallurgy and Exploration. 3rd ed. V1, 1046pg
- Dohm, C., 2005. Quantifiable mineral resource classification – A logical approach, in Leuangthong, O. and Deutsch, C. V., eds., Geostatistics Banff 2004: Springer, Dordrecht, v. 1, pg-333-342
- Durão, R., 2006. Classificação Bayesiana do risco de Incêndio em Portugal Continental. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Georrecursos. IST
- Emery, X. Ortiz, J. M., Rodríguez, J.J., 2006. Quantifying uncertainty in mineral resources by use of classification schemes and conditional simulations @ Mathematical Geology, V. 38, Nº 4, 2006, International Association for Mathematical Geology, pg-445-464
- Folha, R.2015, Relatório de Estágio na EDM-Empresa de Desenvolvimento Mineiro, 1ºsem, 2º ano Mestrado em Engenharia Geológica e de Minas, 43pg
- Gibson, H. L., Allen, R. L., Riverin, G., Lane, T. E., 2007. The VMS Model: Advances and application to exploration targeting, @ Proceedings of exploration 07: fifth decennial international conference on Mineral Exploration, pg-713-730
- Godoy, M., Dimitrakopoulos, R., 2011. A risk quantification framework for strategic mine planning: method and application @ Journal of Mining Science, Vol. 47, No. 2, Pleiades Publishing, Ltd, pg-235-246
- Inverno, C., Díez-Montes A., Carlos, C., Garcia-Crespo, J., Matos, J., García-Lobon, JL, Carvalho, J., Bellido, F., Castello-Branco, J., Ayala, C., Batista, M., Rubio, M, Granado, I., Tornos, F., Oliveira, T., Rey-Moral, C., Araújo, V., Sanchez-Garcia, T., Pereira, Z., Represas, P., Solá, A., Sousa, P., 2015. Chapter: Part IV, 9. The Iberian Pyrite Belt and Ossa Morena Zone Introduction and geological setting; @ 3D, 4D and Predictive Modelling of Major Mineral Belts in Europe, Edition: Mineral Resource Reviews, Springer, pg-191-208
- Isaaks E., Srivastava, R.,1989. An introduction to applied geostatistics. Oxford University Press, New York, 561pg
- JORC, 2012. Australasian code for reporting of exploration results, minerals resources and ore reserves, (The JORC CODE, 2012 Edition): Report prepared by the Joint Ore Reserve Committee of the Australasian Institute of Mining and Metalurgy, Australian Institute of Geoscientists and Minerals Council of Australia

- Journal, A.G; Huijbregts, Ch.J., 1993. Mining Geostatistics. Academic Press, 6ª edição, 600pg
- Krzemién, A, Fernández, P., Sánchez, A., Álvarez, I., 2016. Beyond the pan-european standard for reporting of exploration results, mineral resources and reserves @ Resources Policy N49, pg-81-91
- Munhá, J. 1983 Low-grade regional metamorphism in the Iberian Pyrite Belt: Comunicações dos Serviços Geológicos de Portugal, v.69, pg-3-35
- Munhá, J. 1990, Metamorphic evolution of the South Portuguese/Pulo do Lobo Zone, in Dallmeyer, R.D., and Martinez Garcia, eds., Pre-Mesozoic geology of Iberia: Berlin, Springer-Verlag, pg -.363-368
- Nunes, R., Soares, A., Azevedo, L., Pereira, P., 2016. Geo-statistical seismic inversion with direct sequential simulation and co-simulation with multi-local distribution functions @ Mathematical Geosciences (In press)
- Oliveira, D., Matos, J.X., Rosa, C., Rosa, D., Figueiredo, M., Silva T., Guimarães, F, Carvalho, J., Pinto, A., Relvas, J., Reiser, F., 2011. The Lagoa Salgada Orebody, Iberian Pyrite Belt, Portugal @ Economic Geology, Society of Economic Geologists, Inc., v. 106, pg-1111-1128
- Oliveira, J.T., Pereira, Z., Rosa, C., Rosa, D., Matos, J., 2005. Recent advances in the study of the stratigraphy and the magmatism of the Iberian Pyrite Belt, Portugal @ Journal of the Virtual Explorer, V. 19, paper 9 (electronic edition, ISSN 1441-8142)
- Oliveira, J.T., Relvas, J., Pereira, Z., Matos, J., Rosa, C., Rosa, D., Munhá, J., Fernandes, P., Jorge, R., Pinto, A., 2013. II.2.7. Geologia Sul Portuguesa, com ênfase na estratigrafia, vulcanologia física, geoquímica e mineralizações da faixa piritosa in Dias, R.; Araújo, A.; Terrinha, P.; Kullberg, J. C. (2013) Geologia de Portugal. V.1 – Geologia Pré-Mesozóica de Portugal, pg-673-765
- Pinto, A., Relvas, J., Carvallho, J., Fonseca, R., 2014. High-tech metals in the zinc-rich massive ores of the Neves Corvo deposit @ Comunicações Geológicas, (electronic edition, DOI 101:825-828)
- Portex, 2012 - Lagoa Salgada NI 43-101 Technical Report and Resource Estimate, 88pg
- Redcorp, 2013 - Relatório de Atividades de Prospeção e Pesquisa - Relatório Final (Setembro de 2013)
- Relvas, J., 2000., Geology and metallogenesis at the Neves-Corvo deposit, Portugal: Ph.D. thesis, Portugal, University of Lisbon, 319pg
- Relvas, J., Munhá, J., Barriga, F., Tassinari, C., 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 36(5), pg-416-427
- Relvas, J., Pinto, A., Carvalho, J., Rosa, C., Barriga, F., Pacheco, N., Noiva, P.C., 2014. Shallow sub-seafloor replacement at the Neves Corvo deposit @ Comunicações Geológicas, n. 101, pg-841-843
- Revue, M.B. & Jimeno C.L., 1997. Manual de Evaluación y Diseño de Explotaciones Mineras. Entorno Gráfico, S.L., Madrid, 705pg
- Rosa, C., McPhie, J., Relvas, J., Pereira, Z., Oliveira, T., Pacheco, N., 2008. Facies analyses and volcanic setting of the giant Neves Corvo massive sulfide deposit, Iberian Pyrite Belt, Portugal @ Miner Deposita, Springer-Verlag, (electronic edition, DOI 10.1007/s00126-008-0176-4)
- Rossi M.E, Deutsch C.V, 2014. Mineral Resource Estimation. Springer, 332pg
- Silva, D., 2015. Modelação Estocástica do depósito Mineral do zambujal (Mina de Neves-Corvo): Contribuição da Densidade como Indicador Morfológico. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Geológica. FCT. UNL

Sinclair, A. J. et Blackwell, G. H., 2006. Applied Mineral Inventory Estimation. Cambridge University Press, New York, 346pg

Soares, A., 2001. Direct Sequential Simulation and Cosimulation @Mathematical Geology v. 33, n. 8, pg-911-926

Soares, A., 2006. Geoestatística para as Ciências da Terra e do Ambiente (Geostatistics for Earth and Environmental Sciences). Instituto Superior Técnico Press, 2ª edição, Lisboa 211pg

Tornos, F. 2006. Environment of formation and styles of volcanogenic massive sulfides: The Iberian Pyrite Belt. Ore Geology Reviews, 28: pg-259-307

Websites:

http://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/policy-strategy/index_en.htm - Report on critical raw materials for the EU non-critical raw materials profiles, European Commission

www.bgs.ac.uk/mineralsuk/statistics/europeanStatistics.html

www.bcg.uk

www.eea.europa.eu

www.etpsmr.org/

www.bloomberg.com

www.criusco.com

www.dgeg.pt

www.dpi.inpe.br (Camargo, E)

www.edm.pt

www.geosoft.com

www.ist.utl.pt

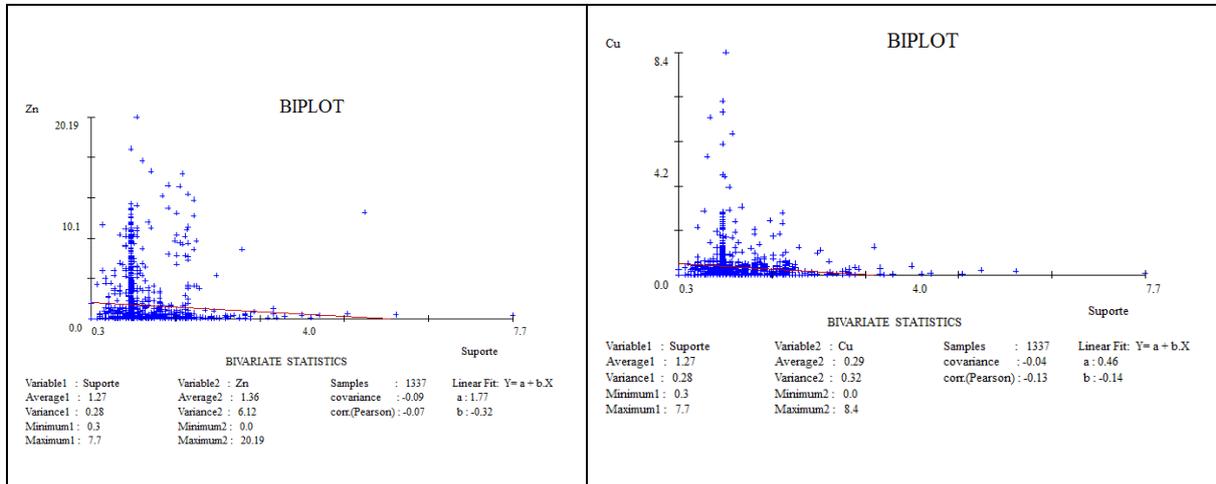
www.portexminerals.com

www.segweb.org

www.usgs.gov

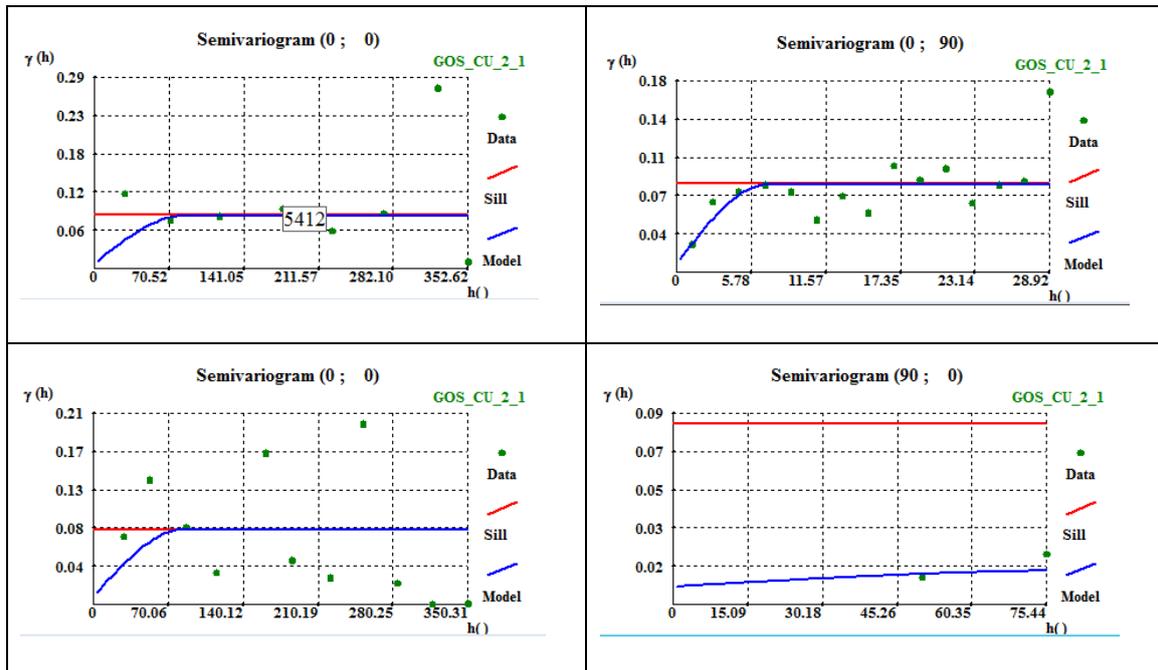
Anexos

Anexo A: Estatística Básica Bivariada – Suporte dos dados

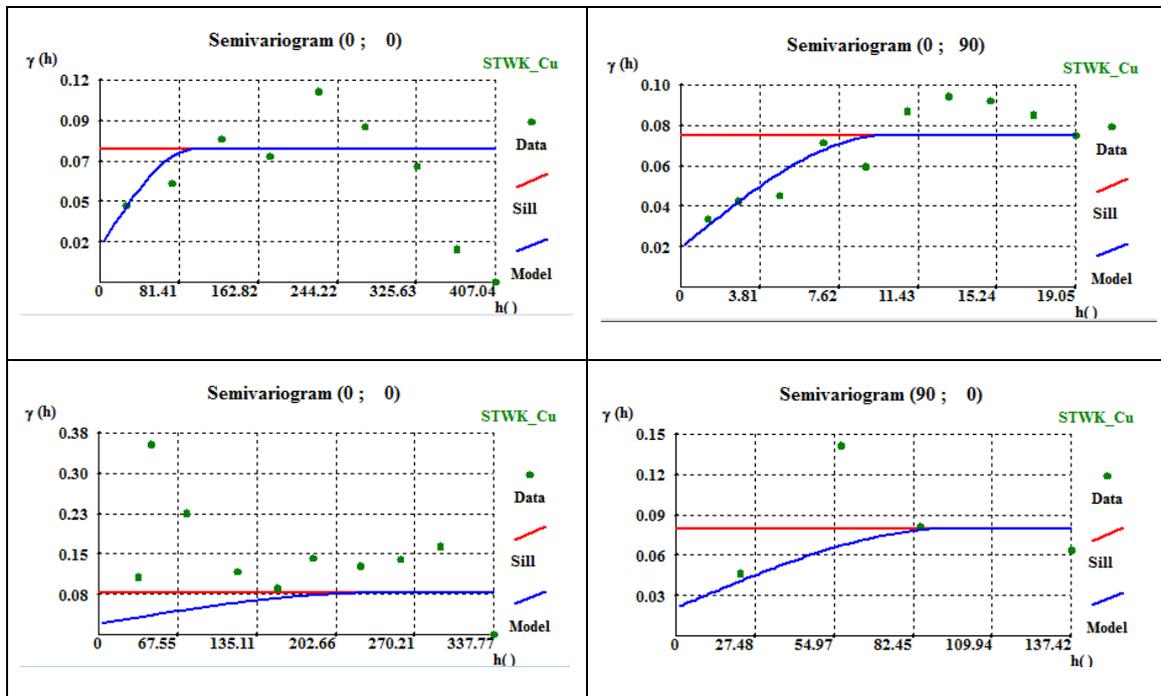


Anexo B: Modelação de variogramas de cobre para o *gossan* e o *stockwork*.

Os valores de corte são 2.1 para o *gossan* e 2.05 para o *stockwork*.



Modelação do variograma experimental para o *gossan*, variável cobre.



Modelação do variograma experimental para o *stockwork*, variável cobre.

Anexo C: Resultados de zinco totais. Variação de tonelagem, teor médio e quantidade de metal consoante a incerteza.

Recursos Totais, Teor de corte >=0% Zn	Ton (t)	8,962,605
	Teor médio (%)	1.68
	Q. metal Zn (t)	150,400

Recursos Indicados						
Teor de corte >=0% Zn						
		GOS	MSX	STWK	Total	
incerteza - intervalo interquartilico relativo	10%	ton (t)	60,200	45,600	2,069,880	2,175,680
		teor médio Zn (%)	0.11	0.92	1.49	1.44
		Q.metal Zn (t)	239	1,321	22,265	23,826
	15%	ton (t)	284,445	241,680	2,425,200	2,951,325
		teor médio Zn (%)	1.25	1.25	1.33	1.32
		Q.metal Zn (t)	0	7,004	26,088	33,091
	20%	ton (t)	567,385	629,280	2,604,270	3,800,935
		teor médio Zn (%)	0.25	1.51	1.27	1.16
		Q.metal Zn (t)	2,253	18,236	28,014	48,503
	25%	ton (t)	881,930	1,142,280	2,687,460	4,711,670
		teor médio Zn (%)	0.29	1.76	1.23	1.19
		Q.metal Zn (t)	3,501	33,103	28,909	65,513
30%	ton (t)	1,136,275	1,714,560	2,769,240	5,620,075	
	teor médio Zn (%)	0.31	2.02	1.20	1.27	
	Q.metal Zn (t)	4,511	49,687	29,788	83,987	
35%	ton (t)	1,389,115	2,241,240	2,822,820	6,453,175	
	teor médio Zn (%)	0.33	2.18	1.18	1.35	
	Q.metal Zn (t)	5,515	64,950	30,365	100,830	
40%	ton (t)	1,572,725	2,631,120	2,883,450	7,087,295	
	teor médio Zn (%)	0.35	2.33	1.16	1.41	
	Q.metal Zn (t)	6,244	76,249	31,017	113,510	

Recursos Inferidos						
Teor de corte >=0% Zn						
		GOS	MSX	STWK	Total	
incerteza - intervalo interquartilico relativo	10%	ton (t)	2,012,185	3,689,040	1,085,700	6,786,925
		teor médio Zn (%)	0.41	2.92	0.29	1.75
		Q.metal Zn (t)	7,989	106,907	11,679	126,574
	15%	ton (t)	1,787,940	3,492,960	728,970	6,009,870
		teor médio Zn (%)	0.43	3.01	0.22	1.90
		Q.metal Zn (t)	7,098	101,225	7,841	116,165
	20%	ton (t)	1,505,000	3,105,360	549,900	5,160,260
		teor médio Zn (%)	0.45	3.18	0.17	2.06
		Q.metal Zn (t)	5,975	89,992	5,915	101,882
	25%	ton (t)	1,190,455	2,592,360	466,710	4,249,525
		teor médio Zn (%)	0.48	3.40	0.16	2.22
		Q.metal Zn (t)	4,726	75,126	5,020	84,872
30%	ton (t)	936,110	2,020,080	384,930	3,341,120	
	teor médio Zn (%)	0.50	3.65	0.15	2.36	
	Q.metal Zn (t)	3,716	58,541	4,141	66,398	
35%	ton (t)	683,270	1,493,400	331,350	2,508,020	
	teor médio Zn (%)	0.52	3.97	0.15	2.53	
	Q.metal Zn (t)	2,713	43,278	3,564	49,555	
40%	ton (t)	499,660	1,103,520	270,720	1,873,900	
	teor médio Zn (%)	0.56	4.26	0.13	2.68	
	Q.metal Zn (t)	1,984	31,980	2,912	36,875	

Anexo D: Resultados de zinco, para teor de corte de zinco $\geq 2\%$. Variação de tonelagem, teor médio e quantidade de metal consoante a incerteza.

Recursos Totais, Teor de corte $\geq 2\%$ Zn	Ton (t)	3,546,630
	Teor médio (%)	2.66
	Q. metal Zn (t)	94,452

Recursos Indicados					
teor de corte $\geq 2\%$ Zn					
		GOS	MSX	STWK	Total
Incerteza -intervalo interquartilico relativo	10%	ton (t)	0	714,870	714,870
		teor médio Zn (%)	0.00	2.63	0.00
		Q.metal Zn (t)	0	18,794	0
	15%	ton (t)	11,400	717,690	729,090
		teor médio Zn (%)	2.76	2.63	2.63
		Q.metal Zn (t)	380	18,868	19,249
	20%	ton (t)	75,240	717,690	792,930
		teor médio Zn (%)	2.51	2.63	2.63
		Q.metal Zn (t)	2,510	18,868	21,378
	25%	ton (t)	335,160	717,690	1,052,850
		teor médio Zn (%)	2.44	2.63	2.57
		Q.metal Zn (t)	11,179	18,868	30,047
30%	ton (t)	834,480	717,690	1,552,170	
	teor médio Zn (%)	2.54	2.63	2.58	
	Q.metal Zn (t)	27,834	18,868	46,702	
35%	ton (t)	1,338,360	717,690	2,056,050	
	teor médio Zn (%)	2.63	2.63	2.63	
	Q.metal Zn (t)	44,641	18,868	63,509	
40%	ton (t)	1,728,240	717,690	2,445,930	
	teor médio Zn (%)	2.75	2.63	2.71	
	Q.metal Zn (t)	57,645	18,868	76,513	

Recursos Inferidos						
teor de corte $\geq 2\%$ Zn						
		GOS	MSX	STWK	Total	
Incerteza -intervalo interquartilico relativo	10%	ton (t)	0	2,831,760	4,230	2,831,760
		teor médio Zn (%)	0.00	3.34	2.10	3.34
		Q.metal Zn (t)	0	94,452	111	94,452
	15%	ton (t)	0	2,820,360	0	2,820,360
		teor médio Zn (%)	0.00	3.34	0.00	3.34
		Q.metal Zn (t)	0	94,072	0	94,072
	20%	ton (t)	0	2,756,520	0	2,756,520
		teor médio Zn (%)	0.00	3.36	0.00	3.36
		Q.metal Zn (t)	0	91,943	0	91,943
	25%	ton (t)	0	2,496,600	0	2,496,600
		teor médio Zn (%)	0.00	3.46	0.00	3.46
		Q.metal Zn (t)	0	83,273	0	83,273
30%	ton (t)	0	1,997,280	0	1,997,280	
	teor médio Zn (%)	0.00	3.67	0.00	3.67	
	Q.metal Zn (t)	0	66,619	0	66,619	
35%	ton (t)	0	1,493,400	0	1,493,400	
	teor médio Zn (%)	0.00	3.97	0.00	3.97	
	Q.metal Zn (t)	0	49,812	0	49,812	
40%	ton (t)	0	1,103,520	0	1,103,520	
	teor médio Zn (%)	0.00	4.26	0.00	4.26	
	Q.metal Zn (t)	0	36,808	0	36,808	

Anexo E: Resultados de cobre totais. Variação de tonelagem, teor médio e quantidade de metal consoante a incerteza.

Recursos Totais, Teor de corte >=0% Cu	Ton (t)	14,852,975
	Teor médio (%)	0.27
	Q. metal Cu (t)	39,447

		Recursos Indicados				
		Teor de corte >=0% Cu				
		GOS	MSX	STWK	Total	
10%	ton (t)	200,165	376,200	14,100	590,465	
	teor médio Cu (%)	0.65	0.30	0.26	0.42	
	Q. metal Cu (t)	885	1,792	26	2,703	
	15%	ton (t)	346,150	1,085,280	200,220	1,631,650
		teor médio Cu (%)	0.31	0.31	0.28	0.31
		Q. metal Cu (t)	1,530	5,171	362	7,064
	20%	ton (t)	427,420	1,881,000	853,050	3,161,470
		teor médio Cu (%)	0.51	0.34	0.29	0.35
		Q. metal Cu (%)	1,890	8,962	1,543	12,395
	25%	ton (t)	478,590	2,553,600	1,741,350	4,773,540
		teor médio Cu (%)	0.48	0.41	0.28	0.37
		Q. metal Cu (t)	2,116	12,167	3,151	17,433
30%	ton (t)	513,205	2,941,200	2,810,130	6,264,535	
	teor médio Cu (%)	0.47	0.44	0.25	0.36	
	Q. metal Cu (t)	2,269	14,014	5,084	21,367	
35%	ton (t)	541,800	3,214,800	4,221,540	7,978,140	
	teor médio Cu (%)	0.46	0.46	0.23	0.33	
	Q. metal Cu (t)	2,395	15,317	7,638	25,351	
40%	ton (t)	550,830	3,372,120	6,036,210	9,959,160	
	teor médio Cu (%)	0.45	0.46	0.21	0.31	
	Q. metal Cu (t)	2,435	16,067	10,921	29,423	

		Recursos Inferidos			
		Teor de corte >=0% Cu			
		GOS	MSX	STWK	Total
10%	ton (t)	388,290	3,358,440	10,515,780	14,262,510
	teor médio Cu (%)	0.34	0.50	0.18	0.26
	Q. metal Cu (t)	1,717	16,002	19,026	36,744
15%	ton (t)	242,305	2,649,360	10,329,660	13,221,325
	teor médio Cu (%)	0.28	0.54	0.18	0.25
	Q. metal Cu (t)	1,071	12,623	18,689	32,384
20%	ton (t)	161,035	1,853,640	9,676,830	11,691,505
	teor médio Cu (%)	0.27	0.61	0.17	0.24
	Q. metal Cu (t)	712	8,832	17,508	27,052
25%	ton (t)	109,865	1,181,040	8,788,530	10,079,435
	teor médio Cu (%)	0.27	0.63	0.16	0.22
	Q. metal Cu (t)	486	5,627	15,901	22,014
30%	ton (t)	75,250	793,440	7,719,750	8,588,440
	teor médio Cu (%)	0.26	0.62	0.15	0.20
	Q. metal Cu (t)	333	3,780	13,967	18,080
35%	ton (t)	46,655	519,840	6,308,340	6,874,835
	teor médio Cu (%)	0.26	0.60	0.15	0.19
	Q. metal Cu (t)	206	2,477	11,414	14,097
40%	ton (t)	37,625	362,520	4,493,670	4,893,815
	teor médio Cu (%)	0.26	0.61	0.15	0.18
	Q. metal Cu (t)	166	1,727	8,130	10,024

Anexo F: Resultados de cobre para teor de corte de cobre $\geq 1\%$. Variação de tonelagem, teor médio e quantidade de metal consoante a incerteza.

Recursos Totais, Teor de corte $\geq 1\%$ Cu	Ton (t)	373,635
	Teor médio (%)	1.42
	Q. metal Cu (t)	5,306

Recursos Indicados						
teor de corte $\geq 1\%$ Cu						
		GOS	MSX	STWK	Total	
Incerteza -intervalo interquartilico relativo	10%	ton (t)	12,040	0	0	12,040
		teor médio Cu (%)	1.10	0.00	0.00	1.10
		Q.metal Cu (t)	132	0	0	132
	15%	ton (t)	13,545	4,560	1,410	19,515
		teor médio Cu (%)	1.10	2.31	1.41	1.40
		Q.metal Cu (t)	149	67	17	233
	20%	ton (t)	13,545	36,480	21,150	71,175
		teor médio Cu (%)	1.10	1.79	1.28	1.50
		Q.metal Cu (t)	149	532	259	940
	25%	ton (t)	13,545	132,240	33,840	179,625
		teor médio Cu (%)	1.10	1.73	1.24	1.59
		Q.metal Cu (t)	149	1,929	415	2,493
30%	ton (t)	13,545	216,600	40,890	271,035	
	teor médio Cu (%)	1.10	1.56	1.23	1.48	
	Q.metal Cu (t)	149	3,159	502	3,809	
35%	ton (t)	13,545	264,480	40,890	318,915	
	teor médio Cu (%)	1.10	1.52	1.23	1.46	
	Q.metal Cu (t)	149	3,857	502	4,508	
40%	ton (t)	13,545	280,440	40,890	334,875	
	teor médio Cu (%)	1.10	1.50	1.23	1.45	
	Q.metal Cu (t)	149	4,090	502	4,740	

Recursos Inferidos						
teor de corte $\geq 1\%$ Cu						
		GOS	MSX	STWK	Total	
Incerteza -intervalo interquartilico relativo	10%	ton (t)	1,505	319,200	40,890	361,595
		teor médio Cu (%)	1.10	1.46	1.23	1.43
		Q.metal Cu (t)	17	4,655	502	5,173
	15%	ton (t)	0	314,640	39,480	354,120
		teor médio Cu (%)	0.00	1.45	1.22	1.42
		Q.metal Cu (t)	0	4,589	484	5,073
	20%	ton (t)	0	282,720	19,740	302,460
		teor médio Cu (%)	0.00	1.42	1.17	1.40
		Q.metal Cu (t)	0	4,123	242	4,365
	25%	ton (t)	0	186,960	7,050	194,010
		teor médio Cu (%)	0.00	1.27	1.17	1.27
		Q.metal Cu (t)	0	2,727	86	2,813
30%	ton (t)	0	102,600	0	102,600	
	teor médio Cu (%)	0.00	1.25	0.00	1.25	
	Q.metal Cu (t)	0	1,496	0	1,496	
35%	ton (t)	0	54,720	0	54,720	
	teor médio Cu (%)	0.00	1.46	0.00	1.46	
	Q.metal Cu (t)	0	798	0	798	
40%	ton (t)	0	38,760	0	38,760	
	teor médio Cu (%)	0.00	1.16	0.00	1.16	
	Q.metal Cu (t)	0	565	0	565	