



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO
Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto
Departamento de Engenharia de Minas
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral – PPGEM



AVALIAÇÃO DA KRIGAGEM INDICADORA PARA O DEPÓSITO DE OURO DE SURUCA – GO

Autor: **GUSTAVO SANT’ANA ZANETTI**

Orientador: **Prof. Dr. IVO EYER CABRAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mineral.

Área de concentração:
Lavra de Minas

Ouro Preto/MG
Agosto de 2011

Z28a

Zanetti, Gustavo Sant'Ana.

Avaliação da krigagem indicadora para o depósito de ouro de Suruca - GO [manuscrito]
/ Gustavo Sant'Ana Zanetti. – 2011.
xv, 107 f.: il. color.; graf. ; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Ivo Eyer Cabral.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas.
Departamento de Engenharia de Minas. Programa de Pós-graduação em
Engenharia Mineral.

Área de concentração: Lavra de Minas.

1. Minas e mineração - Teses. 2. Geologia - Métodos estatísticos - Teses. 3. Modelagem
geológica - Teses. 4. Modelos matemáticos - Teses. I. Universidade Federal de Ouro Preto.
Escola de Minas. II. Título.

CDU: 622.2:519.22

Catálogo: sisbin@sisbin.ufop.br

“AVALIAÇÃO DA KRIGAGEM INDICADORA PARA O DEPÓSITO DE OURO DE SURUCA- GO”

AUTOR: GUSTAVO SANT’ANA ZANETTI

Dissertação apresentada e aprovada em sessão pública em 23 de agosto de
2011.

**“A Cruz sagrada seja minha Luz
Não seja o Dragão meu guia
Retira-te Satanás
Nunca me aconselhes coisas vãs
É mal o que tu me ofereces
Bebe tu mesmo do teu veneno”
(Oração de São Bento)**

Dedico este trabalho aos meus pais, Marcos e Solange por terem me ensinado a viver uma vida digna e me mostrarem que jamais devo desistir. Amo vocês.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ser a base de tudo em minha vida;

aos meus pais e minha irmã;

à minha família que sempre acreditou que eu iria vencer;

ao professor Ivo Eyer Cabral pela orientação e ensinamentos;

ao PPGEM e ao DEMIM pelo apoio e ensinamentos durante toda minha vida acadêmica e em especial ao Marcelo do PPGEM que sempre me ajudou por eu estar a distância e aos professores Hernani Mota de Lima, Milton Brigolini Neme pela força e colaboração;

aos amigos Henrique Vigário, Frederico Carmo e Eriz Gonzáles pela ajuda;

à Yamana Gold Inc. pela confiança no fornecimento dos dados para a elaboração da dissertação;

aos amigos da Yamana, Emerson Ricardo Ré e Tiago Vaz Andrade pela paciência em me tirar dúvidas e em fornecer dados;

às minhas repúblicas BatCaverna e Kaos pela amizade e por me hospedarem quando eu precisava;

aos meus antigos colegas de Maptek que me permitiram assistir as aulas do mestrado: Marcão, Tonhão e Eduardo Coloma;

aos meus amigos e colegas de Moçambique que me incentivaram bastante na etapa final;

e enfim, a Ouro Preto, uma grande escola de vida!

RESUMO

O alvo Suruca é um depósito aurífero de interpretado como um sistema Pórfiro e Epitermal sobreposto pela remobilização dos fluídos orogênicos. O corpo mineralizado de Suruca é definido pelo teor de corte de 0.2 g/t, pois quando se iniciar a operação da mina, o minério proveniente de Suruca será beneficiado na planta de beneficiamento da mina de Chapada (mina do mesmo grupo localizada a cerca de 6 km do alvo Suruca), na qual se aplica este mesmo teor de corte atualmente. Outro evento importante que influencia no depósito é que a alteração hidrotermal no minério está associada aos Halos Sericítico e Propilítico, sendo que juntos os dois correspondem a 80% dos tipos de alteração do depósito.

Desta forma este trabalho teve como um dos objetivos analisar a possível utilização da krigagem de indicadores de variáveis contínuas e categóricas como alternativa de modelagem em relação aos modelos tridimensionais dos corpos mineralizados e aos halos sericíticos e propilíticos para o depósito de ouro Suruca.

Para o desenvolvimento do trabalho, foi utilizado o software Maptek Vulcan que permitiu validar o banco de dados de sondagem, realizar estatísticas básicas, fazer os modelos tridimensionais, criar modelo de blocos para estimativa da krigagem de indicatrizes e posterior comparação.

Os resultados dos modelos tridimensionais mostraram que os mesmos fornecem resultados confiáveis para o cálculo de volumes, individualização dos corpos e forneceram informações aplicáveis a planos de lavra.

Os resultados mostraram que tanto a krigagem de indicatrizes para o corpo mineralizado quanto para os halos de alteração apresentaram resultados satisfatórios e considerados de grande utilidade principalmente durante o período de avaliação do depósito principalmente se houver alguma mudança no teor de corte aplicado, pois a modelagem tridimensional leva muito mais tempo para ser refeito se comparado com uma estimativa com parâmetros, como os variogramas modelados, já conhecidos.

ABSTRACT

Suruca is a gold deposit that is interpreted as a Porphyry and Epithermal system overlapped by the orogenic fluid. Suruca mineralized ore body is defined by a cut-off grade of 0.2 g/t. When the mine operations starts, the Suruca ore will be processed in Chapada mine processing plant (a mine of the same group that is located about 6km away from Suruca), which applies the same cut-off grade nowadays. Another important aspect that influences the deposit is that the hydrothermal alteration in the ore is associated with sericitic and propylitic alteration and together they account around 80% of the alteration types in the deposit.

Thus the goal of this study was the analysis of the possible use of continuous and categorical indicator kriging as an alternative modelling comparing with three-dimensional models of mineralized ore bodies and sericitic and propylitic from Suruca gold deposit.

The Maptek software, Vulcan, was used to validate the drill hole database, perform basic statistics, generate three-dimensional models, create block model for indicator estimation and later comparison.

The results of three-dimensional models have shown that they provide reliable results for the calculation of volumes, ore body individualization and information applicable to mining plans.

The results showed that both indicator kriging to the mineralized ore body and for the alteration presents satisfactory results and considered very useful especially during the evaluation period of the deposit. It is also applicable if there is any change in the cut-off grade applied, because the three-dimensional modelling takes much longer to redo when compared to an estimation with known variogram parameters.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	V
RESUMO	VI
ABSTRACT	VII
LISTA DE FIGURAS	XI
LISTA DE TABELAS	XV
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	- 1 -
CAPÍTULO 2 - ORGANIZAÇÃO, OBJETIVO E RELEVÂNCIA DO ESTUDO	- 4 -
CAPÍTULO 3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	- 5 -
3.0 CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS E ORIGEM DOS DEPÓSITOS MINERAIS.....	- 5 -
3.0.1 Morfologia dos depósitos minerais.....	- 8 -
3.1 USO DE MODELAGEM TRIDIMENSIONAL COM TRIANGULAÇÕES NA AVALIAÇÃO DE RECURSOS MINERAIS	- 9 -
3.2 USO DA GEOESTATÍSTICA NA AVALIAÇÃO DE RECURSOS MINERAIS.....	- 15 -
3.3 VARIOGRAFIA	- 17 -
3.3.1 Isotropia e anisotropia	- 19 -
3.3.2 Os principais modelos de semivariogramas.....	- 19 -
3.4 ESTIMATIVA GEOESTATÍSTICA	- 21 -
3.4.1 Estimador Linear geoestatístico.....	- 22 -
3.4.2 Estimadores não-lineares geoestatísticos.....	- 27 -
3.4.2.1 Krigagem de indicatrizes	- 28 -
3.4.2.1.1 Krigagem de indicatrizes Contínuas	- 30 -
3.4.2.1.2 Krigagem de indicatrizes Categórica	- 32 -
3.4.2.2 Variogramas de variáveis indicatrizes.....	- 33 -
3.5 MODELO DE BLOCOS.....	- 35 -
3.5.1 Efeito suporte.....	- 38 -
3.5.2 Mudança de Suporte.....	- 39 -
3.5.3 Cálculo de reservas utilizando modelo de blocos.....	- 39 -
3.6 O SOFTWARE MAPTEK VULCAN.....	- 40 -
3.6.1 Estrutura de dados no Vulcan	- 41 -
3.6.2 Triangulação no Vulcan	- 42 -
3.6.2.1 Modelos de triangulações de superfície	- 43 -

3.6.2.2 Modelos de Triangulações Sólidas	- 43 -
3.6.3 Modelo de Blocos no Vulcan.....	- 43 -
3.6.3.1 Conceitos na Construção dos Blocos	- 45 -
3.6.4 Geoestatística no Vulcan.....	- 45 -
3.6.4.1 Análise Estatística.....	- 45 -
3.6.4.2 Cálculo de Variograma	- 46 -
3.6.4.3 Modelagem de variograma	- 46 -
3.6.4.4 Estimativa de teor	- 47 -
CAPÍTULO 4 - CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA ESTUDADA	- 48 -
4.1 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA EM ESTUDO	- 48 -
4.2 GEOLOGIA REGIONAL.....	- 49 -
4.2.1. Arco Magmático de Mara Rosa.....	- 51 -
4.2.1.1.- Sequência Metavulcano-Sedimentar Campinorte.....	- 52 -
4.2.1.2. Ortognaisses.....	- 53 -
4.2.1.3. Sequência Metavulcano-sedimentar Mara Rosa	- 53 -
4.2.1.4. Sequência Metavulcano-sedimentar Santa Terezinha	- 55 -
4.2.1.5. Granitos tardi- a pós-orogênicos.....	- 58 -
4.2.1.6 Complexo Hidrolina.....	- 58 -
4.2 Atividade de Pesquisa desenvolvidas.....	- 59 -
4.3 Geologia Local	- 59 -
4.4 Geologia do Depósito	- 63 -
4.5 Estratigrafia	- 66 -
4.6 Mineralização e alteração hidrotermal.....	- 66 -
CAPÍTULO 5 - RESULTADOS.....	- 68 -
5.0 BANCO DE DADOS SURUCA	- 68 -
5.1. RESULTADOS E DISCUSSÕES	- 71 -
5.1.1 Validação do banco de dados e análise estatística dos dados.....	- 71 -
5.1.2 Estatística descritiva das Variáveis.....	- 72 -
5.1.3 Geração da superfície topográfica	- 79 -
5.1.4 Modelagem tridimensional tradicional do corpo mineralizado e dos principais halos de alteração	- 80 -
5.1.5 Regularização das amostras ou composição	- 85 -

5.1.6 Variografia.....	- 88 -
5.1.7 Modelo de blocos.....	- 95 -
5.1.8 Estimativa dos indicadores contínuos e categóricos	- 95 -
CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES	- 100 -
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	- 103 -

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Estrutura simples de uma triangulação	- 10 -
Figura 2- Triangulação de um sólido simples.....	- 10 -
Figura 3 - Exemplo de corpos minerais gerado por meio de métodos diferentes de triangulação (Extraído de Ferreira, 2006).....	- 12 -
Figura 4 - Modelagem geológica tridimensional (retirado de Silva, 2000. Modificado de Kavouras, 1995).....	- 14 -
Figura 5 - Etapas no processo de um estudo geoestatístico (Retirado de Silva, 2000. Modificado de Armstrong, 1998).	- 17 -
Figura 6 - Variograma típico e suas propriedades (Yamamoto, 2001).....	- 18 -
Figura 7 - Principais Modelos variográficos (Retirado de Cintra, 2003).	- 21 -
Figura 8 - Exemplos de resultado de krigagem de indicatriz em modelos de blocos (Retirado de Soares, 2006).....	- 33 -
Figura 9 - Exemplo de um modelo de blocos e seus blocos individuais (células)	- 35 -
Figura 10 - A hierarquia de dados no Vulcan.....	- 41 -
Figura 11 - Criação de modelo de blocos com sub-blocos no Vulcan	- 45 -
Figura 12 - Localização do Alvo Suruca (modificado de Oliveira, 2009)	- 49 -
Figura 13 - Mapa geológico da província Tocantins (retirado de Cintra, 2003, modificado de Fuck et al. 1994 in Arantes et al., 1996).....	- 50 -
Figura 14 - (A) Mapa geológico esquemático do Arco Magmático de Mara Rosa. (B) Mapa geológico do distrito de Cu-Au e Au de Chapada-Mara-Rosa. (C) Perfil estrutural A-A'. (Modificado de Oliveira <i>et al.</i> 2004).	- 52 -
Figura 15 - Mapa Geológico da porção Sul do Arco Mara Rosa. (Retirado de Oliveira (2009), modificado de Oliveira et al. (2006) e Fuck et al. (2006)).....	- 56 -
Figura 16 – Legenda para o mapa geológico da porção Sul do Arco Mara Rosa apresentado na Figura 15	- 57 -
Figura 17 - Mapa geológico da região de Chapada-Suruca com a localização da Cava de Chapada e a Cava desenhada do Suruca (Relatório interno da Yamana).....	- 62 -
Figura 18 - Mapa Geológico do Alvo Suruca (retirado de relatório interno da Yamana). -	64 -
Figura 19 - Histograma do teor de ouro para as rochas inalteradas.....	- 75 -

Figura 20 - Histograma do teor de ouro para a alteração propilítica	- 75 -
Figura 21 - Histograma do teor de ouro para a alteração sericítica	- 76 -
Figura 22 - Histograma do teor de ouro para a alteração potássica	- 76 -
Figura 23 - Histograma do teor de ouro para o solo e laterita	- 77 -
Figura 24 - Histograma do teor de ouro para a zona mottled	- 77 -
Figura 25 - Histograma do teor de ouro para o saprolito.....	- 78 -
Figura 26 - Histograma do teor de ouro para a rocha fresca.....	- 78 -
Figura 27 - Triangulação rotacionada da superfície topográfica (sem escala) do alvo Suruca	- 79 -
Figura 28 - Visualização em planta (sem escala) das curvas de isovalores de cota juntamente com os furos de sondagem realizados para os trabalhos de pesquisa no alvo Suruca	- 80 -
Figura 29 - Visualização rotacionada(sem escala) das seções com os polígonos delimitando a zona mineralizada com corte em 0.2 g/t	- 81 -
Figura 30 - Visualização em planta (sem escala) do modelo tridimensional da zona mineralizada com corte em 0.2 g/t.....	- 82 -
Figura 31 - Visualização rotacionada (sem escala) do modelo tridimensional da zona mineralizada com corte em 0.2 g/t.....	- 82 -
Figura 32 - Visualização rotacionada (sem escala) das seções com os polígonos das alterações sericítica (vermelha) e propilítica (azul).....	- 83 -
Figura 33 - Visualização em planta (sem escala) do modelo tridimensional da alteração seritítica.....	- 83 -
Figura 34 - Visualização em planta (sem escala) do modelo tridimensional da alteração propilítica.....	- 84 -
Figura 35 - Visualização em planta (sem escala) dos modelos tridimensionais da alteração sericítica (vermelho) e propilítica (azul)	- 84 -
Figura 36 - Visualização rotacionada (sem escala) dos modelos tridimensionais da alteração sericítica (vermelho) e propilítica (azul)	- 85 -
Figura 37 - Comprimento das amostras do banco de dados de sondagem	- 86 -
Figura 38 - Comprimento das amostras no banco de dados de compósitos	- 87 -
Figura 39 - Painel do Vulcan mostrando a determinação do comprimento de 1 metro para geração de compósitos pelo método “Run Length”	- 88 -

Figura 40: Figura esquemática representando os parâmetros utilizados para o cálculo do variograma (Modificado de Deutsch e Journel, 1992)	89 -
Figura 41 - Definição das categorias para a geração dos semivariogramas indicadores categóricos	90 -
Figura 42 - Definição dos cortes para a geração dos semivariogramas indicadores contínuos.....	90 -
Figura 43 - Variograma para a direção de maior variabilidade da variável indicatriz de corte de 0.2 g/t de ouro	91 -
Figura 44 - Variograma para a direção de média variabilidade da variável indicatriz de corte de 0.2 g/t de ouro	91 -
Figura 45 - Variograma para a direção de menor variabilidade da variável indicatriz de corte de 0.2 g/t de ouro	92 -
Figura 46 - Variograma para a direção de maior variabilidade da variável indicatriz de alteração sericítica.....	92 -
Figura 47 - Variograma para a direção de média variabilidade da variável indicatriz de alteração sericítica.....	92 -
Figura 48 - Variograma para a direção de menor variabilidade da variável indicatriz de alteração sericítica.....	93 -
Figura 49 - Variograma para a direção de maior variabilidade da variável indicatriz de alteração propilítica.....	93 -
Figura 50 - Variograma para a direção de média variabilidade da variável indicatriz de alteração propilítica.....	93 -
Figura 51 - Variograma para a direção de menor variabilidade da variável indicatriz de alteração propilítica.....	94 -
Figura 52 - Localização das seções veticais realizadas no modelo de blocos	97 -
Figura 53 - Furos de sondagem e modelo de blocos visualizando a variável gerada a partir do modelo tridimensional para a zona mineralizada com corte em 0.2 g/t de ouro (sem escala).....	97 -
Figura 54 - Furos de sondagem e modelo de blocos visualizando a variável estimada para a zona mineralizada com corte em 0.2 g/t de ouro (sem escala).....	98 -
Figura 55 - Visualização do modelo de blocos pela variável gerada a partir do modelo tridimensional para os tipos de alteração sericítica e propilítica (sem escala)	98 -

Figura 56 - Visualização do modelo de blocos pela variável estimada pela krigagem de indicatrizes para a variável categórica tipo de alteração - sericítica e propilítica (sem escala) - 99 -

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classificação Simplificada dos depósitos minerais (Retirado de Brown et. al., 1997)	- 8 -
Tabela 2: Alguns atributos que podem ser atribuídos a blocos de modelo de blocos	- 36 -
Tabela 3: Códigos utilizados para as litologias encontradas no Projeto Chapada.....	- 70 -
Tabela 4: Densidade media dos principais tipos litológicos do Alvo Suruca.....	- 71 -
Tabela 5: Estatística geral para o teor de ouro para o banco de dados de sondagem	- 73 -
Tabela 6: Estatística geral para o teor de ouro para os diferentes tipos de alteração.	- 73 -
Tabela 7: Estatística geral para o teor de ouro para os diferentes tipos de oxidação.	- 74 -
Tabela 8: Parâmetros utilizados para geração dos variogramas	- 89 -
Tabela 9: Resultado dos modelos de variogramas.....	- 94 -
Tabela 10: Informações de orientação do modelo de blocos para Suruca.....	- 95 -

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

Quando se faz um estudo de investimento mineiro ou de viabilidade de um depósito, dois importantes aspectos que influenciam diretamente na decisão são quantidade e qualidade de um corpo mineral.

O objetivo principal na classificação de reservas é a caracterização da quantidade de material e qual o grau de certeza associado a esta quantidade (Froidevaux, 1982 in Yamamoto, 2001). O termo reserva mineral implica que algum tipo de medição física tenha sido efetuado em relação ao teor e a quantidade mineral in situ e, além disso, que sua extração seja viável do ponto de vista tecnológico, hoje ou num futuro próximo e que possa ser realizada com lucro (Yamamoto & Rocha, 1996). Diversos fatores devem ser considerados para a classificação de reservas/recursos minerais de uma região, entre elas podemos citar a variabilidade natural do depósito, estruturas geológicas distintas, complexidade do depósito entre outros. Para Yamamoto (2001), antes de se realizar o cálculo das reservas minerais, deve-se seguir uma seqüência de procedimentos a fim de se reconhecer melhor o comportamento das variáveis a serem calculadas dentro do depósito. Esta seqüência consiste em: composição das amostras dos furos de sonda, análise estatística e por fim a análises variográficas e estimativa de teores.

Para a avaliação confiável, é imprescindível diferentes tipos de informação, como mapa e seções geológicas suportadas por furos de sondas, amostragens, etc. Na década de 1990, esses dados eram guardados de forma analógica e exigiam uma extensa área para armazenamento dos mesmos. Hoje, esses dados armazenam-se em banco de dados digitais mais seguros contra qualquer tipo de depreciação, tanto temporal, quanto pessoal.

É também necessário determinar cuidadosamente as dimensões e orientação de unidades individuais, assim como obter estimativas das propriedades (por exemplo, volume, toneladas, média dos teores) de qualquer volume planejado dentro de um depósito. Conhecimentos semelhantes podem ser utilizados para obter estimativa de capital e custos de operação, juntamente com a quantidade e qualidade do mineral a ser produzido em determinados períodos, além disso, permitindo assim a análise de

viabilidade financeira de diferentes estratégias de exploração a serem avaliadas (Sides, 1996).

Um dos itens de maior importância que servem como entrada para avaliação de qualquer mineral é o formato, as dimensões do corpo mineral e o volume. Em geral, estas informações são obtidas a partir da modelagem geológica que deve representar de maneira adequada as reservas minerais, no qual irá servir para utilização em estudos de viabilidade de um depósito, planos de lavra de uma mina, entre outros.

O teor de corte em um depósito é o teor abaixo do qual o conteúdo do metal ou mineral dentro do minério inviabiliza economicamente a sua lavra. Este teor de corte é influenciado por várias variáveis econômicas e também tecnológicas. Como valores de preço de venda do produto no mercado, custo de matérias primas utilizados para a lavra e beneficiamento de um mineral variam com o tempo, a lavra de um jazimento que em uma determinada época não seria lucrativo, pode se tornar economicamente viável de acordo com estas mudanças ao longo do tempo, assim como um depósito que é viável hoje, pode se tornar um depósito economicamente inviável se houver desvalorização no mercado.

O ouro (do latim aurum) é um elemento químico representado pelo símbolo Au, situado no grupo 11, período 6, bloco d, da tabela periódica. Na natureza, ocorre como um mineral metálico de cor amarela, denso e brilhante. É o mais maleável e dúctil dentre todos os metais podendo um grama ser laminado em uma extensão de aproximadamente um metro quadrado (de Oliveira, 2009).

As reservas auríferas internacionais oficialmente comprovadas perfazem cerca de 90 mil toneladas de ouro metálico *in situ*. Esses depósitos estão amplamente distribuídos em diversos países dos cinco continentes. O crescimento médio anual das reservas mundiais de ouro foi de 4% ao ano até o exercício de 2004, período a partir do qual ocorreu uma estabilidade das reservas internacionais em torno das 90 mil toneladas. Em 1996, ocorreu um significativo acréscimo de 27,6% nas reservas sul-africanas, fato que ocasionou um incremento de 16,4% nas reservas internacionais registrando cerca de 71 mil toneladas de Au contido (de Oliveira, 2009).

A partir de 1997, iniciou-se um período de forte depreciação nos preços do ouro nos mercados internacionais que se estendeu até o ano de 2001. Houve uma forte recessão na indústria mineral. Inúmeros projetos foram suspensos ou adiados e, até mesmo, algumas lavras em atividades foram desativadas. Foi uma temporada que apresentou baixas taxas de reposição de recursos e reservas auríferas. Os depósitos internacionais, ao final deste período, estavam avaliados em cerca de 77 mil toneladas de Au contido (de Oliveira, 2009).

Em 2002, as reservas auríferas mundiais atingiram 89 mil toneladas registrando alta de 14,1% frente ao exercício anterior. Teve início a retomada dos preços do ouro nos mercados globais e um novo aporte de investimento foi direcionado à indústria mineral aurífera. Inúmeras frentes de lavra foram iniciadas e várias outras retomadas; um novo número de países passou a integrar a lista de expressivas reservas globais, dentre eles, China, Indonésia, Peru, Gana, Chile, Mali, Tanzânia e Filipinas. Atualmente, várias dessas nações posicionam-se entre os médios e grandes países produtores de ouro no mundo (de Oliveira, 2009).

CAPÍTULO 2 - ORGANIZAÇÃO, OBJETIVO E RELEVÂNCIA DO ESTUDO

Este trabalho pode ser dividido em duas fases.

Inicialmente fez-se um estudo de revisão bibliográfica sobre os principais materiais, métodos e informações de natureza teórica referente aos métodos a serem utilizados para o desenvolvimento deste trabalho tais como características geológicas e origem dos depósitos minerais, modelagem tridimensional, uso da geoestatística, introdução de krigagem de indicatrizes, modelos de blocos, etc.

A segunda fase refere-se ao estudo de caso, onde é apresentada a caracterização geológica da área estudada, o banco de dados utilizados, a forma como as duas modelagens do corpo mineralizado e dos principais tipos de alteração, os resultados e conclusões.

Como o modelo geológico é a base de estudo para qualquer empreendimento mineiro, o principal objetivo do trabalho foi estudar a possibilidade de se utilizar a krigagem de indicatrizes como uma ferramenta complementar na avaliação geológica do depósito Suruca ou até mesmo na possibilidade de substituição da modelagem tridimensional durante o processo de avaliação.

CAPÍTULO 3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.0 CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS E ORIGEM DOS DEPÓSITOS MINERAIS

Apenas uma concentração anômala de certo elemento químico na crosta terrestre não caracteriza uma jazida mineral. Essa concentração precisa de pelo menos ser mapeada e exequível em termos tecnoeconômico para ser considerada um empreendimento mineiro de pequeno/médio/grande porte. A representatividade espacial do minério só é confirmada com pesquisas contínuas que vão desde estudos conceituais até estudos de detalhe (Ferreira, 2006).

A evolução e a dinâmica dos processos geológicos, desde o pré-cambriano (4,5 Ga) até os dias atuais, podem resultar na concentração de determinados bens minerais de interesse econômico, originando os projetos de mineração. Esses processos geológicos podem acontecer na superfície terrestre (exógenos), como por exemplo, o intemperismo químico e físico, ou no interior da Terra (endógenos), representados pelo vulcanismo, metamorfismo, e etc (Ferreira, 2006).

As mineralizações não ocorrem de maneira totalmente aleatória. A maioria delas obedece a um sistema de zoneamento mineralógico ou metalogenético, ou seja, embora os minerais-minério distribuam-se heterogeneamente dentro da jazida, pode haver um controle de mineralização em determinadas regiões do depósito (Ferreira, 2006).

Cada depósito mineral possui peculiaridades em relação a sua gênese. Os especialistas (geólogos, químicos, etc) em gênese mineral agrupam dentre outros modos os depósitos minerais em função das suas semelhanças e diferenças das várias características intrínsecas e dos processos que os geraram (Ferreira, 2006).

Quando se descreve as características geológicas de um depósito dois importantes parâmetros devem ser considerados: sua forma e seu arcabouço geológico. Esses parâmetros são características específicas dos depósitos e variam amplamente de depósito para depósito. Porém, normalmente é possível identificar feições comuns entre

eles que forneçam a base de um esquema de classificação que os faça ser equivalentes no tipo de formação.

Alguns dos fatores que influenciam diretamente o processo de modelagem geológica são as características geológicas do depósito, assim como o tipo de formação deste, devendo as mesmas ser bem conhecidas e interpretadas como base para uma boa modelagem.

Segundo Brown et. Al. (1997), na descrição da forma de um depósito mineral é importante decidir se o depósito é disseminado ou confinado e se discordante ou concordante. Em depósitos disseminados os minerais de minério estão distribuídos em grandes volumes de rocha, enquanto que nos depósitos confinados, os minerais ocorrem concentrados em um pequeno volume de rocha. A última subdivisão baseia-se na relação entre o depósito e suas rochas hospedeiras (isto é, as rochas que contém o depósito). Depósitos discordantes são invariavelmente mais jovens que suas rochas hospedeiras; geralmente as cortam e mostram relações angulares com as camadas ou qualquer outra estrutura original da rocha. Depósitos concordantes podem ou não ser mais jovens que suas rochas hospedeiras e sempre se posicionam paralelamente ao acamamento ou qualquer outra estrutura da rocha.

Algumas das formas de depósitos também levam nomes mais específicos. Dos depósitos discordantes, as formas mais comuns são veios, que são corpos de formato tabular com orientações das mais variadas. Os veios são raramente paralelos às estruturas das rochas hospedeiras. Esses corpos podem também afinar-se, espessar-se e bifurcar-se ao longo da sua extensão e, dessa forma, criar muitos problemas para um geólogo de mina. Menos comumente, os veios ocorrem como chaminés, que são corpos com formatos mais cilíndricos ou cônicos, embora possam parecer corpos irregulares quando visto em detalhes. Um depósito é determinado *stockwork* quando constituído por uma trama de veios muito pouco espessos, em vez de um único veio. Depósitos discordantes com formas pouco definidas seriam simplesmente designados depósitos irregulares. Por definição, depósitos concordantes posicionam-se paralelamente aos estratos geológicos. Geralmente depósitos tomam a forma tabular dos estratos, caso em que são denominados corpos estratiformes (Brown et. al, 1997).

Os depósitos minerais são formados por processos geológicos que concentram metais em abundância em determinadas regiões de tal forma que esta concentração excede os teores de corte.

A quantidade da concentração de metal varia de depósito para depósito e de metal para metal. Para os elementos maiores a concentração necessária é relativamente pequena, enquanto elementos menores podem requerer fatores de concentração muito grandes.

Seguindo este contexto, Brow et. al. (1997) subdividiu os depósitos minerais de acordo com a natureza dos processos responsáveis pela concentração dos metais que resultaram em três principais grupos:

1. Minérios formados por processos ígneos nos quais a concentração de metais ocorre em câmaras magmáticas.
2. Minérios formados por processos hidrotermais nos quais a concentração de metais é devida à circulação de fluidos aquosos quentes no interior da crosta.
3. Minérios formados por processos que concentram metais próximos à superfície ou na superfície da crosta terrestre.

É possível notar que essa subdivisão apresenta uma forte semelhança com as rochas ígneas, metamórficas e sedimentares. Esse fato não causa surpresa, pois os minérios são, acima de tudo, rochas que contêm como particularidade grande abundância em certos metais. No entanto, as diferenças existem, sendo a mais evidente a tendência que temos em relacionar processos “metamórficos” à formação de rochas e processos “hidrotermais” à formação de depósitos minerais. A razão é que processos metamórficos podem ou não envolver fluidos aquosos quentes; por exemplo, processos metamórficos podem simplesmente envolver a recristalização da rocha no estado sólido. Apenas quando fluidos aquosos quentes estão envolvidos é que os depósitos minerais têm a possibilidade de serem formados (Brown et. all., 1997).

A tabela 1 apresenta uma classificação simplificada pois, na prática, pode ser difícil de classificar um determinado depósito, devido a muitos depósitos serem resultado final de uma variedade de processos de concentração e não somente de um.

Tabela 1: Classificação Simplificada dos depósitos minerais (**Retirado** de Brown et. al., 1997)

Tipo	Modo de formação	Depósitos representativos
ORIGEM POR PROCESSOS ÍGNEOS		
depósitos de segregação magmática	pela deposição de minerais no assoalho da câmara magmática durante o início da cristalização do magma	camadas ricas em magnetita, cromita e platina na intrusão de Busheveld, África do Sul
	pela deposição de fundidos densos de sulfetos ou óxidos que se formaram em partes do magma, cristalizando-se entre os minerais silicáticos neoformados, ou sendo injetados ao longo de falhas e fraturas das rochas encaixantes	depósitos de cobre-níquel da Noruega e do Distrito de Subdury, Canadá; corpos injetados de magnetita na Suécia
depósitos de pegmatitos	pela separação de fluidos aquosos, ricos em silicatos, nos estágios finais da cristalização de um magma granítico	mica, e depósitos de metais menores em Petaca, Novo México; depósitos de metais raros na Noruega e Suécia; urânio em Rossing, Namíbia
depósitos de cobre porfírico	pela expulsão de fluidos ricos em metais de um magma ao longo de pequenas fraturas das rochas encaixantes	depósitos de cobre porfírico da cordilheira americana e ilhas do Pacífico Ocidental; depósitos de molibdênio porfírico de Climax, Colorado; depósitos de estanho porfírico em Potosí, Bolívia
depósitos de metamorfismo de contato	pela substituição das rochas encaixantes de uma intrusão por fluidos ricos em metais expelidos pelo magma	depósitos de magnetita de Iron Springs, Utah; depósitos de cobre de Morenci, Arizona; depósitos de cobre-chumbo-zinco de Bingham, Utah
ORIGEM POR PROCESSOS HIDROTERMAIS		
depósitos exalativos	circulação da água do mar na crosta oceânica e deposição de minério no assoalho oceânico	depósitos de cobre do Chipre e Omam; depósitos de cobre-chumbo-zinco (Kuroko) no Japão; sedimentos metalíferos do Mar Vermelho
depósitos entracrustais	circulação de água do mar através da crosta e deposição de minério em locais adequados	depósitos de cobre-zinco da Irlanda (Tynagh e Navan) e América do Norte (por exemplo, Pine Point); depósitos de estanho tungstênio e Cornwall
ORIGEM POR PROCESSOS DA SUPERFÍCIE		
depósitos residuais	pelo intemperismo, que causa a lixiviação de elementos solúveis, deixando concentrações de material insolúvel	minério de bauxita (alumínio) de Arkansas (EUA), França, Hungria, Jamaica e Guiana
depósitos de pláceres	pela deposição de rochas nas quais os grãos detriticos de minerais de alto valor de uso são concentrados devido à sua alta dureza ou densidade	depósitos de ouro aluvionar da Austrália, Califórnia, Sibéria, Nome (Alasca); pláceres de óxidos de titânio de Travancore (Índia) e Austrália; pláceres de diamante da Namíbia
precipitados químicos	pela precipitação química de certos metais em ambiente sedimentares no continente, em mares rasos ou nos oceanos profundos	depósitos de urânio-vanádio do Colorado; formações ferríferas da América do Norte e Austrália; folhelhos cupríferos (Kupferschiefer) da Alemanha; nódulos de manganês

3.0.1 Morfologia dos depósitos minerais

Os depósitos minerais podem ser classificados de diversas formas referentes à sua geometria. A maioria das terminologias é geralmente subjetiva.

Ferreira (2006) adotou a seguinte classificação:

- Corpos de minério discordantes:

Esses corpos, geralmente, estão associados a depósitos epigenéticos, caracterizados por uma gênese pós-rocha encaixante. Os depósitos apresentam-se nas formas regulares e

irregulares. Os de forma regulares podem ser agrupados de duas maneiras: tabular e em forma de chaminé. Os de formas irregulares podem ser agrupados em depósitos disseminados e em depósitos de substituição.

Corpo de minério concordante:

Geralmente esses depósitos mostram um desenvolvimento considerável em duas dimensões, isto é, se desenvolvem segundo à(s) principal(ais) estruturas das litologias, sendo o acamamento a foliação metamórfica.

3.1 USO DE MODELAGEM TRIDIMENSIONAL COM TRIANGULAÇÕES NA AVALIAÇÃO DE RECURSOS MINERAIS

A forma mais comum para se avaliar depósitos minerais são os métodos computacionais de geração de sólidos em três dimensões chamado de **triangulação ou triangularização**. Estes métodos constituem técnicas de integração de modelos de projeto tridimensional de formas primitivas e geração automática de redes que são definidas como uma representação matemática com grande precisão. Tal metodologia, também funciona para estruturas inscritas em triângulos e tetraedros. A descrição geométrica básica geralmente é executada pelo sistema CAD (Computer Aided Design – Desenho por Auxílio de Computador).

Triangulações podem ser definidas como representações matemáticas, altamente precisas de dados em três dimensões. Um modelo de triangulação é uma série de pontos coordenados em 3D que estão conectados entre eles, formando uma série de planos triangulados que definem uma superfície ou um volume fechado. As figuras 1 e 2 mostram exemplos de triangulação e sólidos de triangulação, respectivamente.

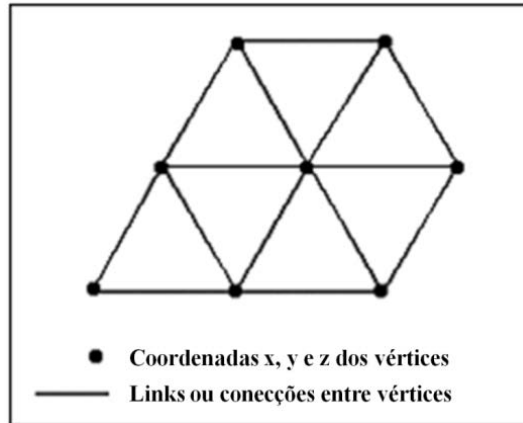


Figura 1- Estrutura simples de uma triangulação

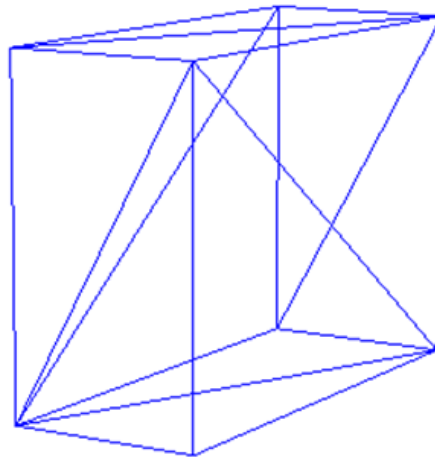


Figura 2- Triangulação de um sólido simples

Em geral, a menos que este seja suavizado, os modelos de triangulações respeitam todos os pontos dos dados, isto é, elas não interpolam os pontos intermediários. Isto significa que onde os dados estão espaçados a triangulação resultante será grosseira e onde os dados são densos, a triangulação resultante será detalhada. Isto permite a criação de qualquer forma complexa, incluindo topografias ou modelos de terreno digitais (DTM), superfícies falhadas, pit, modelos de corpos minerais, etc.

A versatilidade da estrutura das triangulações permite ser usada para muitos propósitos. No entanto, entender o conceito que está atrás é importante quando se aplica a superfícies geológicas particulares ou situações mineiras.

As triangulações podem representar de forma bem apurada qualquer superfície ou forma sólida, resultando em um volume o mais preciso, especialmente quando se compara com outros métodos de cálculo de volume tal como o tradicional poligonal ou do tipo volumétrico “*end-area*”. Isto é real tanto para sólidos para cálculos de volume entre superfícies, ou seja, volume em corte e aterro.

As triangulações permitem a modelagem de um amplo alcance de formas naturais, tais como:

- Topografias
- Escavação mineira
- Superfícies geológicas
- Corpos mineralizados
- Desenvolvimento subterrâneo
- Realces subterrâneos
- Níveis de água
- Falhas geológicas

O amplo alcance de utilidades proporcionadas para a modelagem de triangulações faz dos modelos de triangulações uma poderosa ferramenta de visualização e análise.

A natureza complexa de algumas triangulações requer um considerável cuidado a ser tomado durante sua construção. O procedimento de trabalho deveria ser estabelecido para modernizar estes processos. Além disso, com o incremento no poder da velocidade de processamento dos computadores, o tempo de processamento é agora bem menos

significante. Provavelmente qualquer triangulação que tome um tempo fora do comum para processar, é possível que contenha alguns erros nos dados originais.

Algumas vezes os algoritmos de triangulações criam formas que não reproduzem a forma exata de interesse. Isto ocorre pela experiência de quem maneja os dados.

A figura 3 mostra um exemplo de um corpo mineral gerado por algoritmos diferentes na forma de triangulação tridimensional.

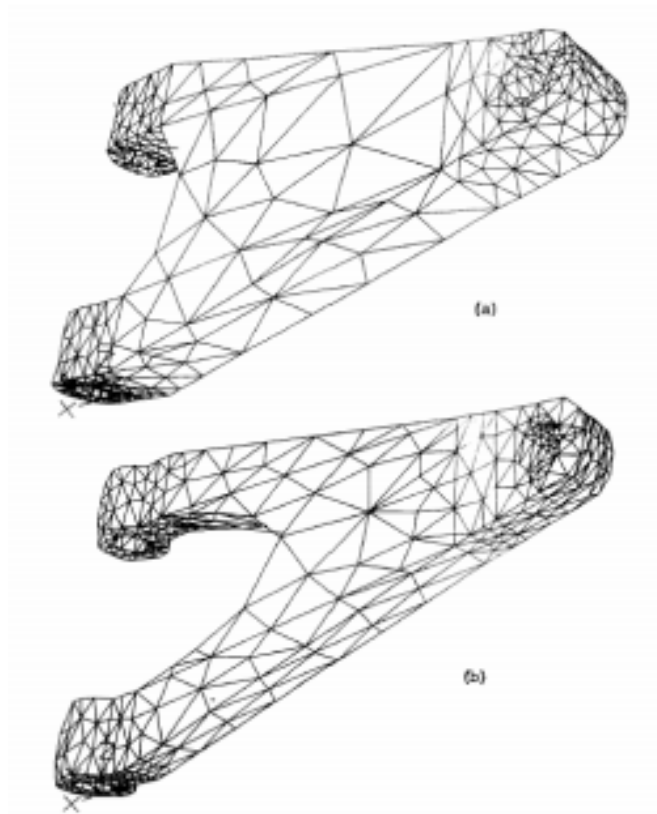


Figura 3 - Exemplo de corpos minerais gerado por meio de métodos diferentes de triangulação (Extraído de Ferreira, 2006).

A técnica mais utilizada para gerar corpos minerais tridimensionais é a partir da geração de seções verticais e/ou horizontais, unido as mesmas através das triangulações utilizando ferramentas computacionais.

A modelagem das seções envolve a caracterização geológica, seções geofísicas e outros. Em um nível de maior subjetividade, esta lista pode incluir a experiência e intuição do

geólogo, advindos do seu conhecimento sobre o fenômeno (Houlding, 1994 in Silva 2000).

A interpretação interativa destes elementos em cada seção gera polígonos que sintetizam áreas com menos atributos geológicos, como litotipos, por exemplo. A união seqüencial destes polígonos permite representar estas formas em três dimensões, através de um corpo sólido que representa a geometria ou volume do atributo a ser representado (Silva, 2000).

A figura 4 mostra de forma genérica o processo de modelagem geológica utilizando sistemas computacionais. A base para a modelagem é um banco de dados com as informações que se deseja modelar. Em seguida criam-se seções visualizando, em geral, um raio de influência até a metade da próxima seção a ser interpretada ou modelada e metade da seção interpretada anteriormente. As interpretações geram polígonos delimitando os domínios modelados de forma a representar os mesmos. Em seguida estes polígonos são unidos de forma sequencial seção por seção gerando um modelo tridimensional por triangulação ou sólidos do domínio. Estes modelos tridimensionais normalmente são utilizados para posterior criação de um modelo de blocos e estimativa de teores.

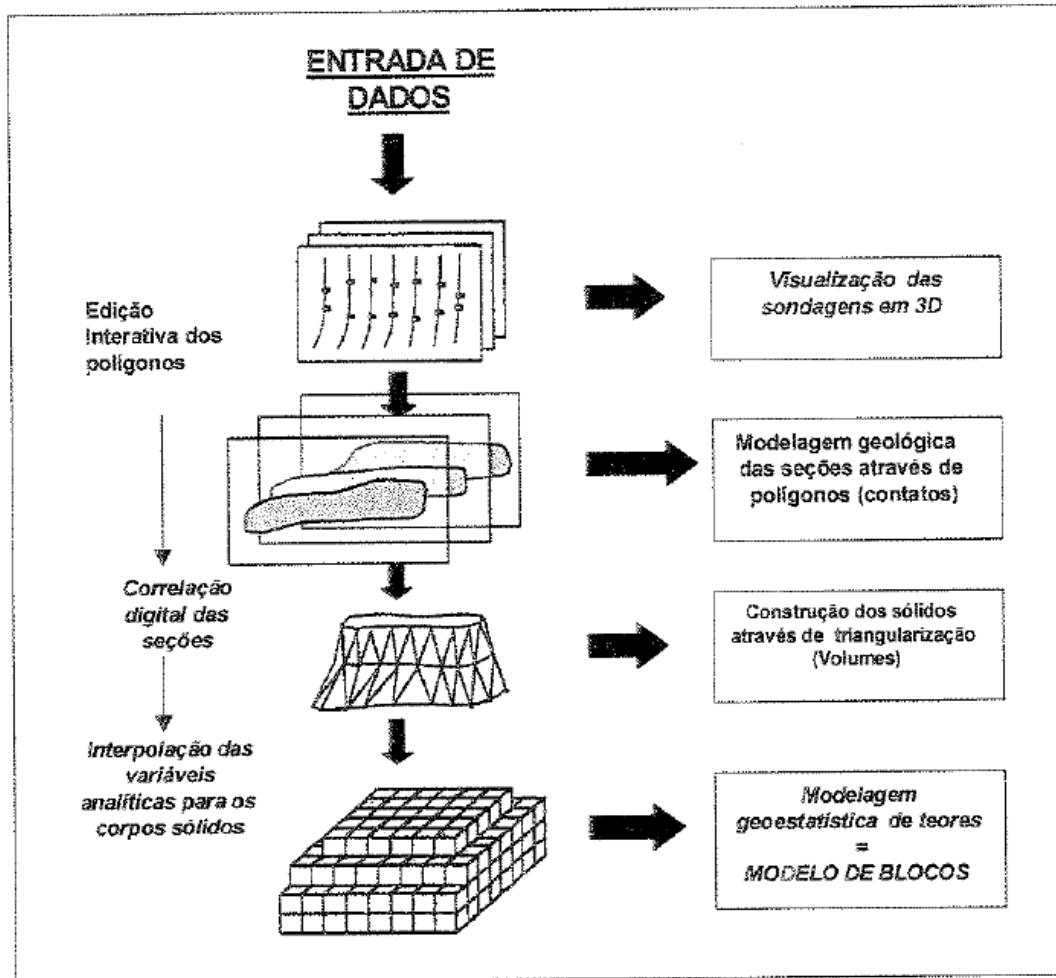


Figura 4 - Modelagem geológica tridimensional (retirado de Silva, 2000. Modificado de Kavouras, 1995).

A geração deste modelo deve ser sempre feita com a interferência do usuário no sistema gráfico (Silva, 2000).

A evolução da modelagem geológica é marcada pela representação precisa de volumes lavráveis e a incorporação da influência destes volumes no processo de avaliação geoestatística das reservas, tornando os modelos geoestatísticos cada vez mais integrados aos modelos geológicos (Silva, 2000).

3.2 USO DA GEOESTATÍSTICA NA AVALIAÇÃO DE RECURSOS MINERAIS

A aplicação de geoestatística em análises de avaliação de recursos/reservas minerais é praticamente indispensável atualmente. O avanço no conhecimento e estudo desta ciência aplicada está ligado à necessidade de melhor conhecimento e aproveitamento dos recursos minerais que se encontram disponíveis.

Os trabalhos de pesquisa que são realizados em depósitos minerais buscam o conhecimento da geologia, da configuração geométrica e do padrão de distribuição espacial das diversas variáveis de interesse para cada tipo de depósito, podendo ser litológicos, geoquímicos, geofísicos ou teores provenientes de análises químicas, entre outros.

A Geoestatística estuda uma variável considerando sua posição no espaço amostral e sua correlação com as demais amostras vizinhas. Esse conceito é descrito na teoria das variáveis regionalizadas apresentadas por Matheron (1963).

Um depósito mineral possui zonas ricas e pobres que são controladas pelo fenômeno geológico que deu origem ao depósito. O valor $z(u)$ de um atributo ou variável Z em uma amostra localizada numa posição u do espaço possui um caráter aleatório local, que obedece a uma lei de probabilidade de uma função aleatória $Z(u)$ (Isaaks & Srivastava, 1989), e possui uma correlação espacial ou covariância com as amostras circunvizinhas, distantes entre si de um vetor h (lag). Essa correlação depende dos valores da variável das amostras, da direção e do módulo do vetor h (Journel & Huijbregts, 1978).

Para cada posição u da área que está sendo estudada, considera-se que o valor obtido em uma amostra localizada em u como aleatório, ou seja, como um possível valor que a variável Z pode assumir obedecendo a uma lei de distribuição de probabilidade para aquele local.

O termo krigagem é atribuído a um conjunto de métodos de estimativas possuindo caráter não-tendencioso e que produzem estimativas melhores pois estão baseados na minimização da variância do erro de estimativa e que levam em conta uma função de correlação espacial, normalmente variograma ou covariância.

Segundo Isaaks & Srivastava (1989), a estimativa por krigagem está associada à abreviatura BLUE (Best linear unbiased estimation); linear, porque a estimativa é uma combinação linear das amostras vizinhas; unbiased, porque a média do erro da estimativa é zero, ou seja, é um estimador não tendencioso, e Best, porque minimiza a variância de estimativa dos erros, produzindo uma ótima estimativa (ao menos em teoria). A estimativa de krigagem e a variância do erro de estimativa são calculadas utilizando o modelo de covariância (ou variograma) obtidos no estudo da continuidade espacial (variografia).

Segundo Royle (1979), os principais argumentos para o uso dos métodos geoestatísticos na avaliação de recursos/reservas minerais são:

- a geoestatística é completamente baseada na prática de boa avaliação fundamentada em uma teoria racional, em vez de uma avaliação mineira intuitiva praticada anteriormente.

- reconhecimento de que a variação total é parte aleatória, e parte espacial, conduzindo a estimativas que não são enviesadas, e com pequenos erros de estimativa.

Em qualquer análise de dados torna-se imprescindível conhecer o tipo de variável que se irá trabalhar, para assim saber qual a ferramenta estatística mais adequada a ser empregada.

Um fluxograma básico e representativo para a análise e processamento de dados da geoestatística é apresentado na figura 5.

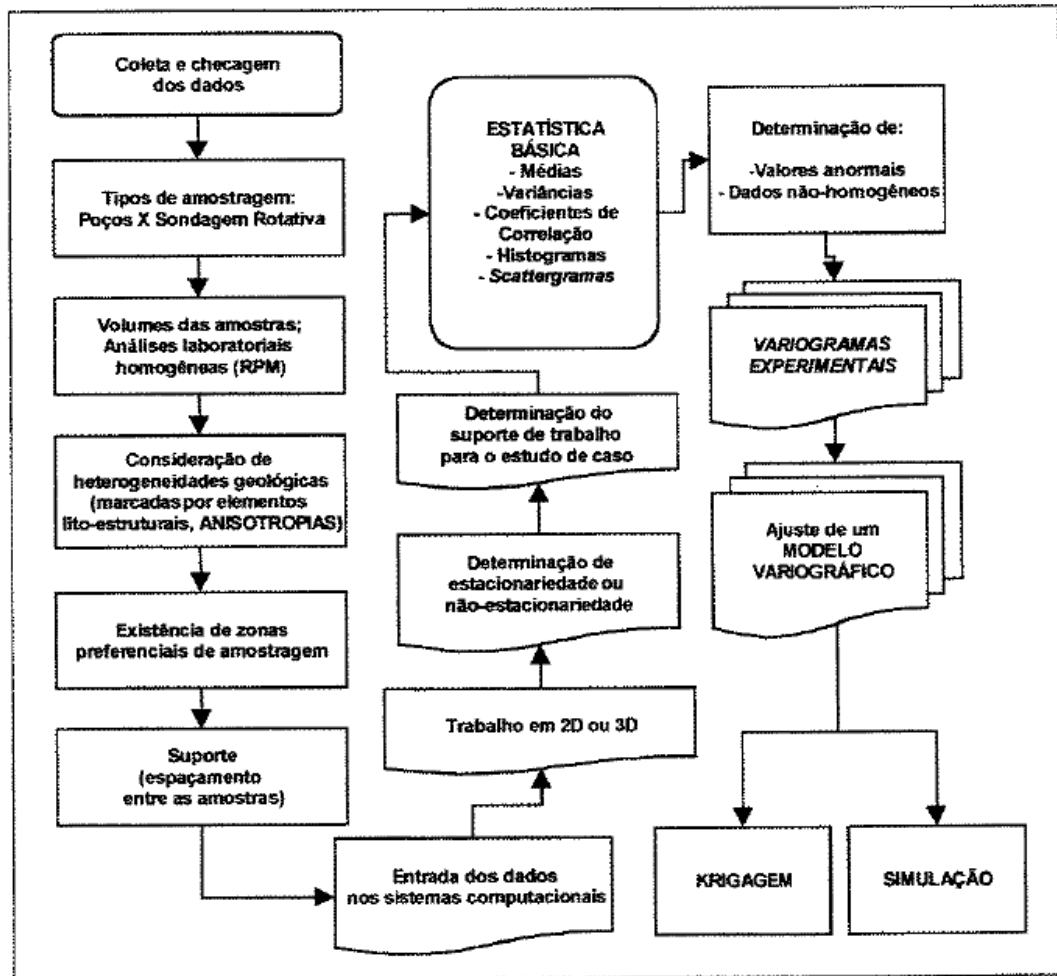


Figura 5 - Etapas no processo de um estudo geoestatístico (Retirado de Silva, 2000. Modificado de Armstrong, 1998).

Em geral, a associação das informações que são obtidas através de um estudo geoestatístico com parâmetros econômicos permite com que seja realizada uma otimização na seletividade e na exploração de recursos minerais.

3.3 VARIOGRAFIA

Um aspecto essencial da modelagem geoestatístico é estabelecer medidas quantitativas da correlação espacial para uso subsequente em estimativa e simulação. A variabilidade espacial é diferente para cada variável em cada tipo de depósito ou mesmo em diferentes fácies ou camadas dentro de um mesmo depósito. (Deutsch, 2002).

A correlação espacial para uma modelagem baseada em objetos é quantificado através do formato dos objetos, tamanho e relações (Deutsch, 2002). O variograma/semivariograma é a medida de correlação espacial que é utilizada na maioria dos casos para se estudar esta variabilidade.

O semivariograma para uma variável ou atributo Z é definido como:

$$\gamma(h) = 1/2 \{ Var [Z(x) - Z(x + h)] \}$$

Através da análise da expressão da função semivariograma, pode-se imaginar que quanto mais próximos estiverem os pontos amostrados, maior será a semelhança entre os valores da variável nos pontos separados pelo vetor distância h e, portanto, menor a semivariância; e quanto mais distantes estiverem os pontos amostrados menor será a semelhança e, conseqüentemente, maior a dispersão (variância).

A figura 6 ilustra um típico variograma com patamar e suas propriedades. A interpretação do variograma permite obter parâmetros que descrevem o comportamento espacial das variáveis regionalizadas.

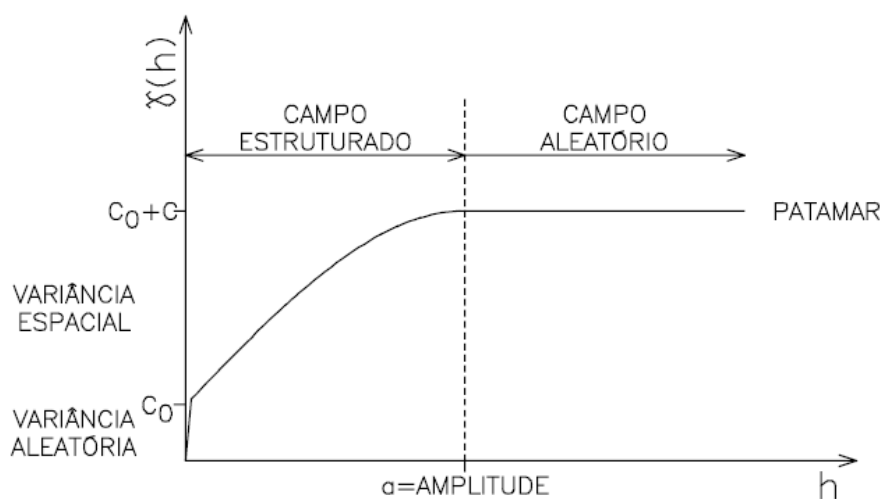


Figura 6 - Variograma típico e suas propriedades (Yamamoto, 2001).

Em relação ao modelo de variograma da figura 6 os seus principais parâmetros são:

- O alcance ou amplitude (Range) de um variograma é a distância até a qual as

amostras apresentam correlação espacial. Logo, a amplitude reflete o grau de continuidade ou de variabilidade entre amostras, quanto maior for a amplitude, maior será a continuidade ou menor a variabilidade entre as amostras para um dado vetor distância h .

- O patamar (sill) é o valor no qual o variograma estabiliza-se, o que acontece a partir da amplitude. A amplitude, portanto define a distância a partir da qual as amostras tornam-se independentes. Para uma distância menor do que a amplitude se diz que existe uma correlação ou grau de dependência espacial entre as amostras.
- O efeito pepita (nugget effect) é o valor da função variograma próximo à origem ($h = 0$).

Teoricamente o valor do efeito pepita é zero, pois duas amostras tomadas no mesmo ponto têm os mesmos valores; entretanto a pequenas distâncias, próximas à zero, este valor pode ser maior que zero, caracterizando uma aparente descontinuidade próximo à origem a uma dada escala de observação. Esta diferença geralmente é atribuída à erros de amostragem, erros analíticos e também a microvariabilidades naturais presentes no depósito.

3.3.1 Isotropia e anisotropia

Note que h é um vetor e, conseqüentemente, o variograma depende da magnitude ou módulo e da direção de h . Quando o variograma é idêntico para qualquer direção de h ele é chamado de isotrópico e quando o semivariograma apresenta os parâmetros C (patamar), C_0 (efeito de pepita), a (amplitude) e/ou modelo diferenciado dependendo da direção de h , ele é chamado anisotrópico.

Desta forma os variogramas podem mostrar diferentes comportamentos quando calculados ao longo de diferentes direções, A estes comportamentos diferentes se dá o nome de anisotropia.

3.3.2 Os principais modelos de semivariogramas

Uma dada variável dentro de um dado domínio como, por exemplo, um depósito, apresenta um variograma real ou verdadeiro que é desconhecido, pois se conhece a

variável somente naqueles pontos amostrados. Este variograma deve ser inferido na prática a partir de um variograma experimental.

Para que esta inferência seja possível a partir das amostras, hipóteses de estacionariedade são assumidas. Mesmo assim, através do variograma experimental pode-se estimar o variograma real somente para determinados vetores distâncias que estão diretamente associados à malha de pesquisa. O gráfico do variograma experimental ($\gamma(h)$) em função da distância (h) mostrará uma série de pontos discretos. Na prática em processos de estimativas e de simulações geoestatísticas é necessário o conhecimento do valor do variograma também para outros vetores h diferentes daqueles estimados através do variograma experimental.

Torna-se necessário então ajustar o variograma experimental através de modelos ou funções matemáticas contínuas. Estes modelos ou funções devem possuir as mesmas propriedades que uma função variograma apresenta, ou seja, $\gamma(h) > 0$, $\gamma(-h) = \gamma(h)$ e devem ser do tipo condicional positiva para qualquer vetor h .

A modelagem do variograma é de fundamental importância em um estudo geoestatístico, visto que os cálculos da geoestatística dependem do modelo de variograma ajustado.

Os principais modelos de semivariogramas utilizados na geoestatística são:

- Esférico
- Exponencial
- Gaussiano
- Modelo linear com patamar
- Modelos sem patamar

A figura 7 mostra de modo comparativo alguns dos principais modelos de variogramas.

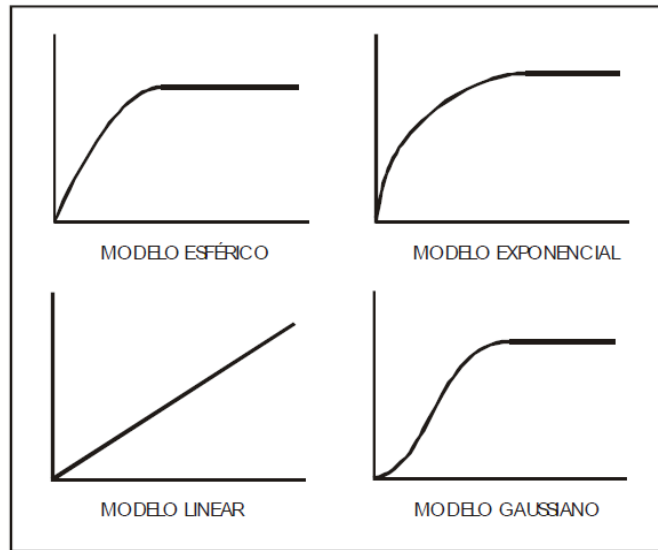


Figura 7 - Principais Modelos variográficos (Retirado de Cintra, 2003).

3.4 ESTIMATIVA GEOESTATÍSTICA

Segundo Soares (2006), os métodos clássicos de inferência espacial de variáveis características de um recurso natural, desde os polígonos de influência, o inverso da potencia da distância e os ajustamentos polinomiais, têm, na sua maioria, duas características comuns: trata-se de métodos deterministas de continuidade estrutural (como os variogramas ou covariâncias) do fenômeno natural em estudo.

Segundo Brooker (1979) citado por Yamamoto (2001), as técnicas geoestatísticas de estimativa, baseadas no estudo da variabilidade espacial do corpo de minério, são superiores porque permitem o cálculo do erro associado às estimativas, chamadas de krigagem. O mesmo autor ainda diz que a krigagem é o procedimento que permite calcular os ponderadores para uma dada configuração (bloco x disposição das amostras no espaço), com mínima variância do erro de estimativa.

O principal motivo de se estimar é atribuir valores em locais onde não se conhece o valor real ou amostral, utilizando-se de valores amostrados na região em estudo.

Dependendo do tipo de variável que se deseja avaliar e o objetivo do estudo, pode-se aplicar métodos de estimativa geoestatísticos de krigagem linear (como a krigagem

simples, krigagem ordinária, krigagem com deriva externa) e a krigagem não-linear (como a krigagem de indicatrizes, krigagem lognormal).

3.4.1 Estimador Linear geoestatístico

Segundo Soares (2006), o estimador linear geoestatístico $[Z(x_0)]^* = \sum_{\alpha=1}^N \lambda_{\alpha} Z(x_{\alpha})$, denominado Krigagem Normal ou Krigagem Ordinária, é uma combinação linear do conjunto de N variáveis vizinhas de x_0 $Z(x_{\alpha}), \alpha = 1, \dots, N$ que cumpre os dois critérios em relação ao erro de estimação $\varepsilon(x_0) = [Z(x_0)]^* - Z(x_0)$: não-enviesado, ou seja, $E\{\varepsilon(x_0)\} = 0$ e variância de estimação mínima, isto é, $\min\{var(\varepsilon(x_0))\}$.

O primeiro critério é conseguido através da imposição da seguinte condição aos ponderadores: $\sum_{\alpha} \lambda_{\alpha} = 1$. A minimização da variância de estimação é assegurada pelo procedimento clássico que se resume a igualar a zero as N derivadas parciais em ordem a $\lambda_{\alpha}, \alpha = 1, \dots, N$ e resolver por qualquer método conhecido o sistema de N incógnitas. No entanto, como se pretende que a solução das N incógnitas cumpra a condição de que $\sum_{\alpha} \lambda_{\alpha} = 1$, então a minimização de

$var\{\varepsilon(x_0)\} = C(0) + \sum_{\alpha} \sum_{\beta} \lambda_{\alpha} \lambda_{\beta} C(x_{\alpha} x_{\beta}) - 2 \sum_{\alpha} \lambda_{\alpha} C(x_{\alpha} x_0)$ pode ser resolvida por intermédio do formalismo de Lagrange, que implica adicionar mais uma equação $\sum_{\alpha} \lambda_{\alpha} = 1$ e, conseqüentemente, mais uma incógnita – o parâmetro de Lagrange μ – à equação:

$$var\{\varepsilon(x_0)\} = C(0) + \sum_{\alpha} \sum_{\beta} \lambda_{\alpha} \lambda_{\beta} C(x_{\alpha} x_{\beta}) - 2 \sum_{\alpha} \lambda_{\alpha} C(x_{\alpha}, x_0) + 2\mu[\sum_{\alpha} \lambda_{\alpha} - 1]$$

sendo o termo adicional nulo, ou seja, $2\lambda_{\alpha}[\sum_{\alpha} \lambda_{\alpha} - 1] = 0$.

A minimização da equação anterior consiste assim, em calcular as $N+1$ derivadas parciais de $var\{\varepsilon(x_0)\}$ em relação a λ_{α} e μ , e, igualando-as a zero, obtendo-se um sistema de $N+1$ equações a $N+1$ incógnitas de cuja solução resultam os N ponderadores λ_{α} que cumprem a condição de não enviesamento $\sum \lambda_{\alpha} = 1$ e, ao mesmo tempo, minimizam a variância de estimação.

$$\frac{\partial[E\{[Z(x_0)]^* - Z(x_0)]^2\}}{\partial \lambda_{\alpha}} + 2\mu(\sum_{\alpha} \lambda_{\alpha} - 1) = 0, \alpha = 1, \dots, N$$

$$\frac{(\partial[E\{[Z(x_0)]^* - Z(x_0)]^2\} + 2\mu(\sum_{\alpha} \lambda_{\alpha} - 1)]}{\partial\mu} = 0$$

O desenvolvimento das N primeiras equações conduz a

$$\frac{\partial[C(0) + \sum_{\alpha} \sum_{\beta} \lambda_{\alpha} \lambda_{\beta} C(x_{\alpha}, x_{\beta}) - 2 \sum_{\alpha} \lambda_{\alpha} C(x_{\alpha}, x_0) + 2\mu (\sum_{\alpha} \lambda_{\alpha} - 1)]}{\partial\lambda_{\alpha}} = 0$$

$2 \sum_{\beta} \lambda_{\beta} C(x_{\alpha}, x_{\beta}) - 2C(x_{\alpha}, x_0) + 2\mu = 0$, com $\alpha = 1, \dots, N$. A última derivada parcial em relação a μ conduz à equação

$$\sum_{\alpha} \lambda_{\alpha} = 1$$

Assim, o sistema de krigagem de N+1 equações, cuja solução nos fornece os N ponderadores λ_{α} , é o seguinte:

$$\begin{cases} \sum_{\beta} \lambda_{\beta} C(x_{\alpha}, x_{\beta}) + \mu = C(x_{\alpha}, x_0), \alpha = 1, \dots, N \\ \sum_{\alpha} \lambda_{\alpha} = 1 \end{cases}$$

Ao se multiplicar cada uma das N primeiras equações deste sistema pelos seus respectivos λ_{α} e somar todas elas se obtém a seguinte expressão:

$$\sum_{\alpha} \sum_{\beta} \lambda_{\alpha} \lambda_{\beta} C(x_{\alpha}, x_{\beta}) + \mu = \sum_{\alpha} \lambda_{\alpha} C(x_{\alpha}, x_0)$$

O valor mínimo da variância da estimação obtém-se pela substituição da expressão anterior na equação $var\{\varepsilon(x_0)\} = C(0) + \sum_{\alpha} \sum_{\beta} \lambda_{\alpha} \lambda_{\beta} C(x_{\alpha}, x_{\beta}) - 2 \sum_{\alpha} \lambda_{\alpha} C(x_{\alpha}, x_0)$, ou seja:

$$\sigma_E^2(x_0) = C(0) + \sum_{\alpha} \lambda_{\alpha} C(x_{\alpha}, x_0) - \mu$$

O sistema de krigagem pode ser também descrito em função do variograma da seguinte forma:

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

$$\begin{cases} \sum_{\beta} \lambda_{\beta} \gamma(x_{\alpha}, x_{\beta}) + \mu = \gamma(x_{\alpha}, x_{\beta}), & \alpha = 1, \dots, N \\ \sum_{\alpha} \lambda_{\alpha} = 1 \end{cases}$$

A variância de estimação fica igual a :

$$\sigma_E^2(x_0) = C(0) + \sum_{\alpha} \lambda_{\alpha} \gamma(x_{\alpha}, x_0) + \mu.$$

Resolução do sistema de equações de krigagem

O sistema de N+1 equações pode ser descrito em notação matricial. Designando por K a matriz de covariância entre amostras, M a matriz do 2º membro – covariâncias entre amostras e o ponto a estimar – e λ a matriz dos ponderadores:

$$[K] = \begin{bmatrix} C(x_1, x_1) & C(x_1, x_2) & \dots & C(x_1, x_N) & 1 \\ C(x_2, x_1) & C(x_2, x_2) & \dots & C(x_2, x_N) & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ C(x_N, x_1) & C(x_N, x_2) & \dots & C(x_N, x_N) & 1 \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[M] = \begin{bmatrix} C(x_1, x_0) \\ C(x_2, x_0) \\ \vdots \\ C(x_N, x_0) \\ 1 \end{bmatrix} \quad [\lambda] = \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_N \\ \mu \end{bmatrix}$$

O sistema de krigagem fica igual a

$$[K] \cdot [\lambda] = [M]$$

Cuja solução resulta, após a inversão de K:

$$[\lambda] = [K]^{-1} \cdot [M]$$

$$\sigma_E^2(x_0) = C(0) - [\lambda]^T \cdot [M].$$

Definindo-se [Z] como o vetor dos valores $Z(x_{\alpha})$, isto é, $[Z] = [Z(x_1), \dots, Z(x_N)]$, então o estimador $[Z(x_0)]^*$ fica igual a

$$[Z(x_0)]^* = [\lambda]^T \cdot [Z] = [M]^T \cdot [K]^{-1} \cdot [Z].$$

Representação dual do sistema de krigagem

O estimador $[Z(x_0)]^* = [M]^T \cdot [K]^{-1} \cdot [Z]$ pode ser descrito do seguinte modo:

$$\begin{aligned} [Z(x_0)]^* &= ([M]^T \cdot [K]^{-1} \cdot [Z])^T \\ &= [Z]^T \cdot [K]^{-1} \cdot [M] \\ &= [b]^T \cdot [M] \end{aligned}$$

Em que $[b]^T = [Z]^T \cdot [M]^{-1}$

Assim, o estimador é representado de uma forma dual de krigagem:

$$[K] \cdot [b] = [Z].$$

Ao contrário do sistema de krigagem ordinária, os ponderadores $[b]$ não dependem da localização do ponto a estimar, x_0 , e são definidos, de início, com base nos valores das amostras e nas covariâncias entre amostras. Daí resulta a desvantagem da utilização desta formulação dual: para se estimar um dado ponto x_0 , tem de se utilizar o conjunto total de amostras, ou seja, não se podem utilizar somente as amostras locais vizinhas de x_0 , tal como na krigagem ordinária.

Segundo John Vann & Daniel Guibal (2000), a krigagem ordinária é o mais sofisticado interpolador linear, tendo vantagens sobre o método do inverso da distância pois ele garante mínima variância do erro de estimativa devido a:

1. Um modelo especificado de variabilidade espacial (por exemplo, variograma ou outra caracterização da covariância/correlação espacial), e
2. Uma configuração de dados/bloco especificado (em outras palavras, a “geometria” do problema).

O segundo critério envolve o conhecimento das dimensões do bloco e geometria, a localização e o suporte das amostras informantes, e a pesquisa utilizada (ou “vizinhança da krigagem”). Variância mínima da estimativa simplesmente significa que o erro da estimativa é minimizado pela krigagem ordinária. Dado um modelo de variograma apropriado, a krigagem ordinária irá realizar o inverso da distância ponderado porque a

estimativa será suavizada de uma maneira condicionada pela variabilidade espacial dos dados (conhecido pelo variograma).

Segundo Soares (2006), os ponderadores do estimador de krigagem resumem fundamentalmente dois fatores:

- O fator distância estrutural entre amostras e o ponto a estimar. Do segundo membro do sistema de krigagem deduz-se que, quanto mais próximas estiverem as amostras do ponto a estimar, maior será seu peso no estimador.

- O fator de desagrupamento (declustering) originado pela matriz de covariâncias entre as amostras (primeiro membro do sistema de krigagem). Quanto mais correlacionadas estiverem as amostras, maior o efeito de agrupamento ou redundância e menor será o seu peso individual na construção do estimador.

De acordo com Vann & Daniel Guibal (2000), as principais limitações da estimativa linear na qual a krigagem ordinária fornece a melhor solução se referem a:

1. Quando se é motivado a estimar a distribuição ao invés de simplesmente um valor esperado em alguma localização (ou sobre alguma área/volume, se nós estamos falando sobre estimativa de bloco). Interpoladores lineares não podem fazer isso. Os casos são muitos: reservas de minério recuperável em uma mina, a proporção de uma área excedendo algum limite de contaminante em um mapeamento ambiental, etc.
2. Quando se está lidando com alguma forte distribuição enviesada, por exemplo, um depósito de metal precioso ou urânio, e simplesmente estimando a média por um estimador linear (por exemplo krigagem ordinária) é arriscado, pois a presença de valores extremos torna qualquer estimador linear muito instável. Pode-se requerer um conhecimento da distribuição dos teores de forma a se obter o melhor estimador da média. Isto normalmente envolve algumas pressuposições sobre a distribuição (por exemplo, qual é o formato da cauda desta distribuição?) mesmo em situações em que evidentemente se está “livre de distribuição” (como por exemplo utilizando a krigagem das indicatrizes).

3. Quando se está estudando uma situação onde a média aritmética (e portanto o estimador linear utilizado para obtê-lo) é uma medida inapropriada da média, por exemplo, em situação de não aditividade como permeabilidade para aplicações de petróleo ou resistência do solo para aplicações de engenharia geológica.

3.4.2 Estimadores não-lineares geoestatísticos

Pelo ponto de vista geoestatístico, interpoladores não-lineares são uma tentativa de estimar a esperança condicional, e também a distribuição condicional dos teores em uma localização, como oposição de simplesmente prever o teor por si só. Neste caso se quer estimar a média do teor (esperado) em alguma localização sob a condição de que se conhece alguns valores de amostras próximas (expectativa condicional). Esta esperança condicional, com algumas exceções espaciais (por exemplo sobre o Modelo Gaussiano) é não-linear (Vann & Daniel Guibal, 2000).

A principal aplicação da estimativa não-linear é na quantificação do percentual de um bloco SMU (Selective Mining Unit) estar acima ou abaixo de um teor de corte ou de um atributo limite (litologia, tipo de alteração, tipo de oxidação, entre outros).

Os estimadores geoestatísticos não-lineares, como o próprio nome já diz, se utilizam de funções não-lineares para obter ou aplicar uma esperança condicional em uma localização, através de uma distribuição de probabilidades naquela localização. Desta forma pode-se estimar a probabilidade de um teor ou de um determinado atributo em uma localização qualquer estar acima ou abaixo de um dado limite conhecendo-se informações de amostras vizinhas.

Vann & Daniel Guibal (2000), apresentam alguns métodos disponíveis para se fazer estimativas locais, sendo as seguintes:

- Krigagem Disjuntiva (Disjunctive kriging- DK) – (Matheron, 1976, Armstrong and Matheron, 1986a, 1986b);
- Krigagem de indicatrizes (Indicator kriging – IK) – (Journel, 1982, 1988) e variantes (Multiple Indicator kriging; Median Indicator kriging, etc);

- Krigagem Probabilística (Probabilistic kriging – PK) – (Verly and Sullivan, 1985);
- Krigagem lognormal (Lognormal kriging – LK) – (Dowd, 1982);
- Krigagem Multigaussiana (Multigaussian kriging – MK) – (Verly and Sullivan, 1985, Schofield, 1989a, 1899b);
- Condicionamento Uniforme (Uniform Conditioning – UC) – (Rivoirard, 1994, e Humphreys,1998);
- Krigagem de indicatrizes residual (Residual Indicator kriging – RIK) – (Rivoirard, 1989).

3.4.2.1 Krigagem de indicatrizes

Segundo Landim & Sturaro (2002), as variâncias de krigagem, sendo condicionadas apenas pelo arranjo geométrico dos pontos e, portanto, independentes dos valores das amostras, não são normalmente medidas de acurácia da estimativa local. Para satisfazer esta necessidade uma das soluções apontadas é a krigagem de variáveis indicatrizes, também chamada de krigagem das indicatrizes ou simplesmente krigagem indicadora (KI). O enfoque passa a ser neste caso, não estimar valor, como na krigagem ordinária, mas sim definir áreas com maior ou menor probabilidade que um determinado evento ocorra (Oliveira, 2008).

O formalismo da krigagem de indicatrizes (KI) foi apresentado por Journel (1983) como uma proposta para construir uma função de distribuição de probabilidades acumuladas para a estimativa de distribuições espaciais (Oliveira, 2008). Na krigagem de indicatrizes é feita a estimativa de uma variável chamada indicadora ou indicatriz obtida a partir de uma transformação realizada sobre outra variável. A variável indicatriz indica se a variável sobre a qual a transformação é realizada pertence a uma dada classe de valores. Se a variável pertence àquela classe de valores a sua correspondente variável indicatriz recebe o valor 1, e em caso contrário, o valor 0.

Na krigagem de indicatrizes é necessária a realização de uma transformação não linear sobre o conjunto $Z(x)$ de dados amostrais, a qual é denominada codificação por indicação (Imai ET AL., 2003 in Oliveira, 2008).

Segundo Smith & Williams (1996), a variável indicatriz fornece uma estimativa da distribuição acumulada condicionada (CDF – conditional cumulative distribution) em uma localização u para um dado limite ou parâmetro de corte z_x .

$$\begin{aligned} z_x: i(u; z_x) &= E\{I(u; z_x | (n))\} \\ &= Prob\{Z(u) \leq z_x | (n)\} \\ &= F(u; z_x | (n)) \end{aligned}$$

$I(u; z_x)$ é a probabilidade de que a variável Z na localização u seja menor ou igual ao valor de corte z_x .

$i(u; z_x)$ é um estimador de $I(u; z_x)$ condicionado ou baseado em n amostras disponíveis tomadas na vizinhança de u .

Uma vez que os dados de indicatriz estão gerados e os variogramas de indicatrizes estão modelados, os modelos são aplicados em variáveis indicatrizes utilizando um método de krigagem ordinária como a seguir:

$$F(u; z_x | (n)) \cong [i(u; z_x)]^* = \sum_{j=1}^n \lambda_j(u; z_x) i(u; z_x)$$

Onde $F(u; z_x | (n))$ é o valor estimado na localização u para o valor de corte z_x , baseado em n amostras vizinhas de u , e $\lambda_j(u; z_x)$ para $j=1,2,\dots,n$ são os ponderadores de krigagem. $F(u; z_x | (n))$ é a distribuição acumulada condicionada (CDF).

Segundo Rocha & Yamamoto (2003) (in Oliveira, 2008), a principal vantagem da krigagem de indicatrizes é a de ser uma técnica paramétrica, ou seja, nenhum tipo de distribuição para uma determinada variável aleatória é considerado a priori. Isto possibilita uma estimativa da função de distribuição para tais variáveis, permitindo a determinação de incertezas e a inferência de valores do atributo em locais não amostrados. Essa técnica também possibilita a modelagem de dados com grande variabilidade espacial.

A codificação pode ser realizada tanto para uma variável contínua quanto para uma variável categórica. O resultado da KI dentro de uma área A é uma estimativa da probabilidade de uma variável Z estar acima ou abaixo de um dado valor de corte no caso de uma variável contínua, ou da probabilidade de uma variável Z pertencer a uma dada categoria no caso de uma variável categórica.

3.4.2.1.1 Krigagem de indicatrizes Contínuas

Para uma variável contínua o teor $Z(x)$ dentro de uma área A e para um dado teor de corte z, a variável indicatriz pode ser definida como:

$$i(A; z) = \begin{cases} 1, & \text{se } Z(x) < z \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

Segundo Soares (2006), apesar da simplicidade da metodologia de cálculo de valores da lei de distribuição de probabilidades de $Z(x)$, no ponto x ou na área A, ela contém, no entanto, alguns inconvenientes que, apesar de na prática, não serem limitativos, é necessário tê-los em conta.

1. Para diferentes valores de corte z_1 e z_2 , o método não garante a manutenção da relação de ordem

$$[I_{z_1}(x_0)]^* \leq [I_{z_2}(x_0)]^* \text{ se } z_1 < z_2,$$

uma vez que as estimações de $[I_{z_1}(x_0)]^*$ e $[I_{z_2}(x_0)]^*$ são independentes.

Para que aquela relação seja verdadeira para qualquer par de valores z_1 e z_2 , é suficiente que os ponderadores para a estimação de $[I_{z_1}(x_0)]^*$ e $[I_{z_2}(x_0)]^*$ sejam iguais e positivos, isto é, independentes de z.

Isto implica que na maioria das situações, é suficiente que seja utilizado sempre o mesmo modelo de variograma para qualquer corte z.

Note-se, no entanto, que esta é uma simplificação, pois há situações em que os valores extremos de z têm variogramas diferentes.

2. Uma vez que o estimador de krigagem impõe que a soma dos ponderadores seja 1 mas não impõe que não haja ponderadores negativos ou superiores a 1, não há a garantia de que os valores estimados estejam compreendidos entre 0 e 1. A solução mais simples consiste em impor após a estimativa estas condições aos estimadores.

No planejamento de mina pode-se desejar separar o material em minério e estéril baseado em um particular teor do minério; o minério deverá ser separado em algumas pilhas de estoque baseado em outros cortes de teor. Em muitos casos, os teores de corte utilizados em uma estimativa de indicadores, devem ser os mesmos dos teores que existe relevância na prática para a operação de uma mina em que será aplicado. Muitas aplicações ambientais também têm limiares que são significativos por razões de saúde e segurança, e estimativas de indicatrizes em determinados cortes podem ser suficientes para enfrentar os objetivos de um estudo ambiental (Isaaks & Srivastava, 1989).

Quando se aumenta o número de limiares (cortes) nos quais se estima uma porção cumulativa, pode-se refinar a aparência da distribuição cumulativa estimada e o seu histograma correspondente. A habilidade de refinar a distribuição cumulativa é limitada, entretanto, pelo número de amostras na vizinhança. Se existem apenas algumas amostras disponíveis, então a distribuição estimada irá parecer totalmente grosseira apesar dos números de cortes que escolhermos (Isaaks & Srivastava, 1989).

Na prática atual, nós devemos cuidadosamente considerar os números de cortes nos quais nós precisaremos estimar. Embora o uso de vários cortes possam nos permitir gerar histogramas visualmente satisfatórios, este é raramente o objetivo principal de um estudo. Para a maioria dos problemas práticos que requerem técnicas de indicatrizes, uma consideração cuidadosa do objetivo final nos permite utilizar alguns limiares bem escolhidos (Isaaks & Srivastava, 1989).

Se não existem limiares (ou teores de corte) que possuem importância para o problema a ser enfrentado, a prática mais comum é executar a estimativa de indicadores em nove cortes correspondentes aos dez décimos existentes de uma distribuição global. Apesar de ser convencional esta opção ainda é arbitrária; se há uma parte em particular da distribuição para os quais a estimativa é mais importante, então se deve escolher mais cortes dentro daquele intervalo. Por exemplo, em muitos depósitos de minerais preciosos a maior parte do metal está contido em uma pequena porção de um alto teor de minério. Em muitas situações, faz sentido executar a estimativa de indicadores em vários cortes altos desde a precisa estimativa da menor porção da distribuição (Isaaks & Srivastava, 1989).

Não importa quantos cortes sejam escolhidos com o método de indicatrizes, a curva de distribuição cumulativa será estimada em apenas um número finito de pontos. Para uma estimativa da curva completa, será necessária uma interpolação entre os pontos estimados. Esta interpolação e extrapolação necessariamente envolvem algumas pressuposições sobre como a distribuição se comporta nos pontos onde não foi diretamente estimada. Nós sabemos que em uma função de distribuição acumulada é não decrescente e que não pode ser menor que 0 e nem maior que 1, entretanto, mesmo com estas restrições existem várias funções diferentes que podem passar pelos pontos existentes (Isaaks & Srivastava, 1989).

3.4.2.1.2 Krigagem de indicatrizes Categórica

No quadro conceitual da estimação geoestatística da forma do corpo, o elemento unitário consiste na probabilidade de um ponto, localizado no espaço, pertencer a um de um conjunto de corpos complementares e disjuntos. As formas dos diferentes corpos resultam de um processo de classificação destes elementos com maior probabilidade de pertencer a cada um deles. (Soares, 2006).

Soares (2006) define a variável indicatriz categórica $I(x)$ de estruturas bifásicas (dados qualitativos como, por exemplo, litologia) como sendo uma variável que pode assumir dois valores possíveis na localização espacial x num sistema binário composto por 2 corpos, X e seu complementar X_c , dentro de uma área A , ou seja :

$$I(x) = \begin{cases} 1 & \text{se } x \in X \\ 0 & \text{se } x \in X_c \end{cases}$$

$$\text{Sendo } A = X \cup X_c$$

O conjunto de N amostras disponíveis em A e codificadas nos dois estados possíveis “1” ou “0” de acordo com a probabilidade de pertencer a X ou a X_c , $I(x_i)$, $i = 1, \dots, N$, pode ser interpretado também como uma função aleatória $I(x)$. A variável indicatriz pode ser interpretada como uma realização dessa função aleatória.

Conhecendo-se os variogramas das variáveis indicatrizes é possível através de uma krigagem das indicatrizes estimar a probabilidade de uma dada localização u não amostrada pertencer a um dado corpo ou a uma dada litologia.

A figura 8 mostra dois exemplos de corpos litológicos estimados pela krigagem de indicatriz em um modelo de blocos.

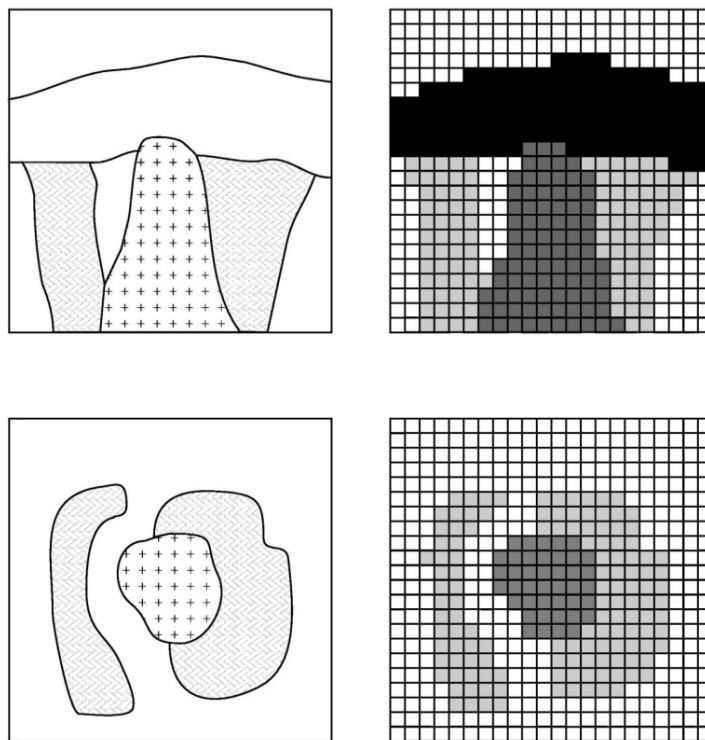


Figura 8 - Exemplos de resultado de krigagem de indicatriz em modelos de blocos (Retirado de Soares, 2006).

3.4.2.2 Variogramas de variáveis indicatrizes

A krigagem ordinária requer um modelo de variograma ou a função de covariância da variável que está sendo estimada. A estimativa para n diferentes valores de corte requer um modelo de continuidade espacial para cada um dos n valores. Agora na estimativa de indicadores muito mais que no original n valores, devem-se utilizar um modelo de variograma da continuidade espacial dos indicadores. Quando se aplica o procedimento da krigagem ordinária na estimativa de um indicador em corte particular, o ideal seria utilizar um modelo de variograma que reflete o molde para aquele corte em particular. Por exemplo, a krigagem ordinária da média local para um corte de 65 ppm deve ser feito com um variograma que captura a continuidade espacial dos indicadores para um corte 65 ppm; a estimativa da média global do indicador para o corte de 225 ppm, por

outro lado, deve utilizar um modelo de variograma que descreve a continuidade espacial dos indicadores para o corte de 225 ppm (Isaaks & Srivastava, 1989).

A habilidade de utilizar diferentes padrões de continuidade espacial para diferentes limiares distingue a krigagem ordinária dos outros procedimentos para estimar a média local de um indicador. Com a krigagem ordinária os pesos atribuídos na vizinhança de um corte em particular irão depender do modelo de variograma escolhido para aquele corte (Isaaks & Srivastava, 1989).

Para se estimar indicadores devem-se gerar modelos de variogramas para cada corte no qual se deseja fazer a estimativa. Variogramas das amostras devem ser calculados e modelados para cada corte. Felizmente variogramas das amostras calculadas de dados indicadores são geralmente bem comportados. Desde que uma variável de indicador seja 0 ou 1, variograma de indicadores não sofrem do efeito adverso de valores extremos erráticos. De fato, mesmo em estudos onde a krigagem de indicadores não será utilizada, variograma de indicadores são frequentemente utilizados para revelar o modelo da continuidade espacial da variável original. Apesar de serem mais facilmente interpretados e modelados que o variograma das variáveis originais, variogramas de indicadores são facilmente afetados por agrupamento preferencial de dados de amostras. A estrutura revelada pelos variogramas de indicadores não pode ser devido ao modelo da continuidade espacial, mas sim pelo agrupamento de um conjunto de dados de amostras (Isaaks & Srivastava, 1989).

A krigagem ordinária de indicadores em vários cortes, utilizando modelos de variogramas separados para cada corte, é usualmente referida simplesmente como krigagem de indicadores.

Existe também, uma aproximação para a krigagem de indicadores que, em muitas situações, produzem bons resultados. Esta aproximação consiste em utilizar o mesmo modelo variograma para a estimação em todos os cortes. A escolha do modelo de variograma para todos os cortes é comumente utilizando os dados de indicadores a um corte próximo da mediana. A prática tem mostrado que o variograma baseado em indicadores definidos pela mediana dos cortes normalmente se comporta melhor que os variogramas baseados em indicadores definidos em outros cortes. Quando o variograma

utilizado para a krigagem de indicadores frequentemente utilizado é o de indicadores medianos, este procedimento é usualmente referido como krigagem de indicadores medianos (Isaaks & Srivastava, 1989).

Com um modelo de variograma para todos os cortes, os pesos aplicados para cada amostra não dependem do corte. Uma vez que os pesos tenham sido calculados para a estimativa do indicador no primeiro corte, eles podem ser utilizados novamente para estimar qualquer outro corte. Isto torna a krigagem mediana de indicadores computacionalmente mais rápida que a krigagem de indicadores, no qual requer que os pesos sejam recalculados para cada corte quando o modelo de variograma mudar de um corte para o próximo (Isaaks & Srivastava, 1989).

3.5 MODELO DE BLOCOS

Um modelo de blocos pode ser definido como sendo uma série de cubos que coletivamente definem um grande cubo. Cada cubo menor é referido como um “bloco” ou uma célula que definem um exato pedaço do espaço em 3D.

Uma série de variáveis ou atributos são atribuídos a cada bloco e desta forma todo o volume coberto pelo modelo de blocos é definida. A figura 9 exemplifica um modelo de blocos com seus blocos individuais.

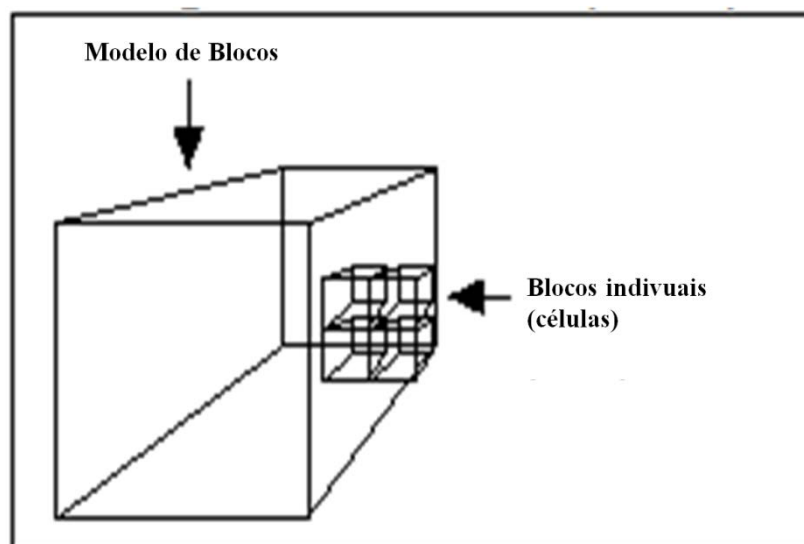


Figura 9 - Exemplo de um modelo de blocos e seus blocos individuais (células)

Alguns dos atributos (variáveis) que podem ser aplicados a cada bloco individual dentro de um modelo de blocos estão apresentados na tabela 2:

Tabela 2: Alguns atributos que podem ser atribuídos a blocos de modelo de blocos

Atributos Geométricos	Coordenadas das posições (para o centro do bloco) e número indexador x, y e z , dimensão dos lados
Atributos de Classificação	Tipo de rocha tipo de minério status de intemperismo número do pit
Atributos de Teor	Teores estimados variáveis de teor valores de confiança custos de mina (\$/t) resistência da rocha
Atributos Numéricos Absolutos	Valores monetários gramas de metal KJ de calor

Assim, uma série de blocos adjacentes com a mesma classificação de tipo de rocha coletivamente define uma parte de uma estrutura geológica e os valores de uma variável armazenando teores de ouro definem a distribuição de ouro dentro de um corpo mineral.

Dentre as vantagens de se utilizar modelos de blocos pode-se citar:

- Um modelo de blocos pode ser uma estrutura de dados muito eficiente para armazenar uma grande quantidade de informações.

- Permitem que você defina o modelo a uma resolução que é relevante para seu entendimento da geologia ou das condições da mineração. Esta flexibilidade também permite definir um volume onde cada unidade do espaço possui uma série de atributos.
- Cálculos rápidos entre valores de variáveis permitem efetiva estimação de reservas geológicas e estudos da mina a serem realizados.
- Técnicas de visualização do modelo de blocos fornecem uma valorosa comunicação e ferramentas de análises.
- O aumento da utilização dos métodos geoestatísticos para expressarem as distribuições de teor requer uma estrutura em modelo de blocos para armazenar os resultados da estimação.
- As aplicações tradicionais de modelos de blocos têm sido em ambientes geológicos complexos onde modelos de superfícies simples não podem definir adequadamente a geometria e a distribuição de teores de vários depósitos.
- Os modelos de blocos podem ser utilizados para definir tendências dentro de depósitos e são aplicáveis para qualquer tipo de estrutura geológica.
- As técnicas de otimização de cava necessitam de um modelo de blocos como dado de entrada.

Dentre as desvantagens da utilização de Modelos de Blocos:

- Assim como “grids” em duas dimensões, ele pode não representar precisamente superfícies complexas com linhas de quebra como, por exemplo, regiões onde há grande influência de uma falha geológica.

Os modelos de blocos são utilizados para diversas finalidades. Por exemplo, eles constituem uma peça chave para computar dados geológicos, estimativa de teores, cálculo de reservas e computar processos de mineração. Onde suas habilidades são aplicadas, promovem grandes benefícios para o planejamento eficiente de uma mina ou para entender a situação geológica e já se tornou uma peça indispensável quando se está executando um plano de lavra.

3.5.1 Efeito suporte

A escolha do tamanho dos blocos de um modelo de blocos para uma estimativa é um ponto fundamental que deve ser levado em conta toda vez que é criado um modelo de blocos que será estimado.

Suporte é o termo utilizado na geoestatística para denominar o volume no qual os valores médios podem ser computados ou medidos. Uma especificação completa do suporte inclui o formato, tamanho e orientação do volume. Se o suporte de uma amostra é muito pequeno em relação aos outros suportes considerados, por exemplo, amostras de furos de sondagem no qual as análises de ouro foram feitas, as vezes se assume que o suporte das amostras é pontual. (Vann & Guibal, 2000).

Cruz Júnior & Remacre (2001) explicaram o efeito suporte da seguinte maneira: Seja uma reserva mineral dividida em blocos grandes V e subdividida em blocos pequenos v . Assim definem-se os teores de blocos $Z(v_i)$ e $Z(V_i)$ sobre os dois suportes v e V . Tem-se $E[Z(v_i)] = E[Z(V_i)]$ e $var[Z(v_i)] > var[Z(V_i)]$. Logo, existem duas populações de teores distintas entre si, que produzem histogramas diferentes. Essa diferença, nos histogramas entre os dois suportes, é chamada de *efeito suporte*.

Uma das formas de se verificar o efeito suporte é através do cálculo das variâncias, pois normalmente a variância mede a dispersão de valores em, torno de um valor médio. A dispersão ou variância de teores aumentam com a diminuição do tamanho do suporte.

Vann et. al. (2000), disseram que uma das perguntas mais frequentes feitas por profissionais de geoestatística é: “Qual o tamanho “seguro” de bloco?”. Esta pergunta não pode ser facilmente respondida quando não se conhece a variabilidade espacial do depósito em questão.

O mesmo autor ainda cita algumas generalizações que podem ser feitas:

- Em situações (incomuns) onde o efeito pepita é muito baixo, o variograma não mostra uma estrutura de pequeno alcance, e um alcance longo que seja significativamente maior que a malha de sondagem, blocos pequenos podem possivelmente ser estimados com resultados razoáveis utilizando métodos lineares.

- Em geral, estimar blocos que são consideravelmente menores que a média do espaçamento entre os furos (diz apreciavelmente menor que a metade do tamanho) é potencialmente um grande risco.

3.5.2 Mudança de Suporte

Quando se quer prever reservas lavráveis em um depósito, a mudança de suporte é indispensável. Quando se está fazendo um estudo de viabilidade de um depósito é tomada uma decisão considerando fatores econômicos, Esta decisão é feita utilizando-se como base as amostras feitas por furos de sondagem de exploração.

A mudança de suporte se torna necessária para se atingir resultados adequados, pois o planejamento e a lavra são feitos sobre suportes ou volumes bem maiores do que os suportes das amostras.

Quando se tem um grande efeito pepita, ou uma estrutura importante em pequena escala aparentemente detectada pela variografia, o impacto na mudança de suporte será pronunciado (Vann & Guibal, 2000).

Existem várias metodologias para a mudança de suporte, porém a maioria delas possui características em comum:

- A média da distribuição se mantém inalterada em todos eles;
- Elas reduzem a variância por algum fator previsível conhecido por fator f ;
- O formato deve se tornar sistemático.

Alguns métodos conhecidos para a mudança de suporte foram apresentados por Isaaks & Srivastava (1989):

- Transformando uma distribuição para outra (Transforming One Distribution to Another);
- Correção Affine (Affine Correction);
- Correção Lognormal Indireta (Indirect Lognormal Correction);

3.5.3 Cálculo de reservas utilizando modelo de blocos

Em geral os modelos de blocos são utilizados para o cálculo de reservas.

Todos os métodos existentes para avaliações de reservas procuram determinar, segundo seus princípios, os valores médios das variáveis de interesse (teor, densidade e espessura), que, aplicados às equações básicas de reservas, fornecem o valor da reserva de uma porção ou de todo o depósito (Yamamoto, 2001).

Quando se determina a reserva em peso do conteúdo metálico, de óxido ou elemento útil, determina-se também a tonelagem ou volume de minério. Por isso, muitas vezes a reserva é expressa em termos de tonelagem de minério para uma determinada concentração (Yamamoto, 2001).

O cálculo de reservas tem como objetivos fundamentais a melhor estimativa de teor e tonelagem dos blocos de um corpo de minério, bem como a determinação do erro provável dessas estimativas em certo nível de confiança. A relevância dessas estimativas depende da qualidade, quantidade e distribuição espacial das amostras e do grau de continuidade da mineralização (regularidade do corpo de minério) (Yamamoto, 2001).

Os resultados do cálculo de reservas servem de base para todos os estudos de viabilidade técnica e econômica posteriores. Tais estudos visam a determinação dos seguintes parâmetros: produção anual, vida útil provável da mina, método de lavra, método de beneficiamento e investimentos (equipamentos, mão de obra, instalações, energia, materiais, etc.) (Yamamoto, 2001).

Utilizando um modelo de blocos, o cálculo de reserva de um minério, por exemplo, pode ser feito calculando a soma dos blocos que foram atribuídos como minério e o teor médio do minério, para o mesmo, como a média ponderada destes mesmos blocos.

3.6 O SOFTWARE MAPTEK VULCAN

O software Maptek Vulcan é um software desenvolvido para modelagem geológica 3D, dados de topografia, e planejamento de mina. O Vulcan fornece ferramentas para avançadas informações espaciais em 3D, modelagem, visualização e análises em campos que atuam desde planejamento de mina a planejamento de reabilitação e gerenciamento ambiental.

O Maptek Vulcan é um software modular e dentro de cada módulo se encontram as ferramentas adequadas de acordo com a área de atuação do profissional.

O módulo utilizado para a realização do trabalho foi um GeoStatModeller.

O Vulcan GeoStatModeller é uma ferramenta versátil para modelagem de recursos, para geólogos e engenheiros procurando por gerenciamento de incerteza.

No Vulcan, existem diversos outros módulos ou “upgrades” que podem ser adicionados ao mesmo para maior abrangência dentro de outros tipos de análises, dentre eles podemos citar os módulos de simulação gaussiana & cokrigagem, otimização de cavas (pit optimizer), desenhos de mina a céu aberto e subterrâneo, entre outros.

3.6.1 Estrutura de dados no Vulcan

O software Vulcan organiza os dados de desenho (strings) hierarquicamente em forma de complexidade decrescente, e proporciona métodos para agrupar dados dentro dele e em níveis cruzados. Estas facilidades de estrutura e agrupamento de dados entregam um flexível sistema de organização de dados, que quando é usado corretamente, pode traduzir-se em um real aumento de produtividade.

Os dados de desenho no Vulcan estão estruturados em 5 níveis hierárquicos de forma que o maior agrupe os níveis menores conforme mostrado na figura 10. Estes níveis são: “Folder” (Pasta), “Design File” (Arquivos de Desenho), “Layer” (Camadas), “Object” (Objetos) e “Point” (Pontos).

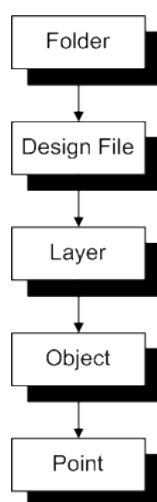


Figura 10 - A hierarquia de dados no Vulcan.

A **Pasta (Folder)** é a área de trabalho do Vulcan, sendo um diretório no arquivo de sistemas do computador. Esta pasta contém todos os arquivos usados em um projeto. Os tipos de arquivos ou especificações serão organizados automaticamente em **sub-pastas virtuais** pelo Vulcan em seu Explorer (gerenciador de arquivos) próprio de acordo com a extensão ou tipo do arquivo.

O **Arquivo de Desenho (Design File)** é o arquivo de base de dados por definição do Vulcan. Este arquivo contém os dados de desenho ou CAD criados durante o projeto.

Acompanhando o arquivo de desenho sempre há um arquivo índice que contém uma lista de todas as layers dentro do arquivo de desenho. Uma área de trabalho do Vulcan pode conter um ou mais arquivos de desenho.

As **Layers** são a maior classificação de agrupamento em um arquivo de desenho. No Vulcan sempre deve ser definida uma layer padrão (default) para trabalhar nela. Esta é chamada **current layer (layer atual)**. Um arquivo de desenho (dgd) pode conter uma ou mais layers.

Os **Objetos** são entidades comprimidas de dados sequenciais. Por exemplo: uma linha, (um grupo sequencial de pontos conectados), um polígono (uma linha fechada), ou um grupo de pontos desconectados. Uma layer pode conter um ou mais objetos.

Os **Pontos** são a unidade mínima de dados, coordenadas comprimidas de x, y, z. Os Objetos podem conter um ou mais pontos.

3.6.2 Triangulação no Vulcan

O Vulcan usa dois termos para categorizar triangulações. Estes termos são superfícies e sólidos.

Um modelo de triangulação de superfície é uma representação **aberta** de dados 3D. Por **aberta** se entende que a triangulação tem bordas distintas, e tal borda não fecha um volume.

Um modelo de triangulação **sólida** é uma representação fechada de dados 3D. Isto é, o modelo não tem bordas distintas e, portanto fecha um volume.

3.6.2.1 Modelos de triangulações de superfície

O método de triangulações de superfície usa como núcleo a técnica de “*Delaunay*” de tal maneira que de uma distribuição dada de pontos XY, ajusta uma série de triângulos tais que cada triângulo seja ou se aproxime de triângulo equilátero. Este método é considerado por muitos, o que melhor triangula um conjunto de dados para problemas de aproximação de superfície.

3.6.2.2 Modelos de Triangulações Sólidas

Como mencionado antes, um modelo de triangulação sólida é uma representação 3D fechada dos dados, isto é, o modelo não tem bordas distintas e por isso devem incluir um volume.

Há um número de diferentes técnicas de modelagem de sólidos. As mais usadas são:

- Criação de modelos sólidos usando **polígonos**
- Criação de modelos sólidos usando operações de **boolean**
- Criação de modelos sólidos usando operações de **addition**
- Qualquer combinação destes três métodos.

Alguns usos para modelos de sólidos são:

- Representação 3D de características particulares, isto é, edifícios, desenvolvimentos subterrâneos, corpos mineralizados, etc.
- Cálculos de volumes mais precisos.
- Como base ou “esqueleto” para a construção de modelos de blocos.

3.6.3 Modelo de Blocos no Vulcan

A estrutura do modelo do modelo de blocos no Vulcan é binária e não pode ser editado ou visualizado em um editor de texto. Várias técnicas gráficas são fornecidas para edição e visualização.

Todo modelo de blocos é definido através das seguintes informações:

- Nome do Modelo
- Ponto de origem em coordenadas absolutas
- Ângulos de rotação para definir a orientação do modelo
- Data do último acesso
- Data de criação
- Número de blocos
- Número de variáveis
- Variáveis existentes no modelo
- Códigos de traduções para as variáveis
- Número de esquemas

É através da manipulação dos valores de blocos individuais que se obtém os benefícios da modelagem por blocos.

A criação de um modelo de blocos pode incluir a definição da geometria da geologia ou pode ser grid regular simples. Se a fase de construção inclui a definição da geometria da geologia, é possível visualizar os resultados antes de aplicar os processos de estimativa de teores. Esta visualização permite validar o processo de construção e observar se a resolução desejada foi atingida.

O próximo passo no processo de geração normalmente é o processo de cálculo da distribuição de teores. Isto pode ser obtido com vários processos como inverso da distância ou as técnicas de krigagem. Um elevado grau de controle pode ser aplicado ao processo de tal forma que cada domínio geológico ou geoestatístico pode ser definido com precisão e separadamente.

No Vulcan, uma vez que os teores forem atribuídos, uma completa visualização, em forma de fatias ou contornos, pode ser utilizada para confirmar e entender a distribuição dos teores.

As ferramentas de manipulação de modelo de blocos no Vulcan permitem a definição de novas variáveis por classificação de minérios ou por cálculos diversos. Cálculo simples de reservas pode ser realizado para definir a reserva ou dentro de blocos de mina individuais ou em zonas.

3.6.3.1 Conceitos na Construção dos Blocos

A estrutura do modelo de blocos do Vulcan permite ao usuário a utilização de sub-blocos para dar a habilidade de criar um modelo de blocos eficiente, enquanto continua tendo a resolução para apresentar uma superfície detalhada, conforme mostra na Figura 11.

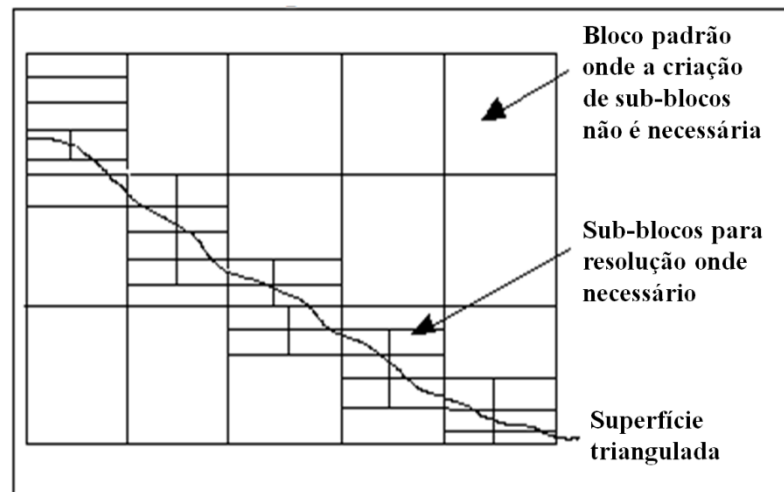


Figura 11 - Criação de modelo de blocos com sub-blocos no Vulcan

A aplicação de prioridades em superfícies 2D ou 3D permite definir uma estrutura geológica de uma maneira lógica e geologicamente intuitiva.

Um exemplo seria quando há um dique que é geologicamente de uma formação mais tardia que as outras estruturas existentes em um depósito, devedo ter maior prioridade em relação às outras durante a criação de um modelo de blocos.

3.6.4 Geoestatística no Vulcan

A parte Geoestatística é baseada no código GSLIB, utilizando um ambiente para modelagem acurada e rápida. Muitas ferramentas de análises estatísticas e geoestatísticas estão disponíveis, incluindo:

3.6.4.1 Análise Estatística

- Análise do perfil de contato
- Desagrupamento de células (Cell - Declustering)

- Plotagem de distribuição e histograma
- Box Plot
- Plotagens de distribuição de probabilidades cumulativa e log normal
- Plotagens de linha, multilinha e Scatter
- Gráfico de Pizza
- Gráfico PP e QQ
- Ternário

3.6.4.2 Cálculo de Variograma

- A variografia experimental pode ser feita utilizando diferentes funções estruturais, tais como: General relative semivariogram, Pairwise relative semivariogram, Semivariograma, semi-variograma cruzado, variograma, covariância, covariância cruzada, correlograma, rodograma, madograma, semivariograma dos logaritmos e semivariograma das indicatrizes.
- Parâmetros de busca podem ser estabelecidos para cada direção
- Visualização gráfica em 3D da geometria e de dados de busca para fácil compreensão
- Mapa de variograma em 3D para facilitar a análise de anisotropias
- Determinação automática de múltiplas direções ortogonais para um dado vetor.

3.6.4.3 Modelagem de variograma

- Oito diferentes modelos elementares podem ser usados no ajustamento variográfico
- Modelagem interativa em 3D com múltiplas estruturas
- Adequação automática do modelo
- Arquivos do modelo prontos para serem usados na estimativa de teor

- Análise visual de dados, modelos e parâmetros experimentais

3.6.4.4 Estimativa de teor

- Distância Inversa
- Krigagem simples
- Krigagem Ordinária
- Validação cruzada em todos os modos lineares
- Visualização gráfica em 3D do elipsóide de busca
- Krigagem de múltiplos indicadores
- Correções Lognormais, Afins e Indiretas com múltiplas saídas simultâneas
- Simulação do Indicador (modo de estimação)
- Definição de múltiplos limites suaves
- Controle de “outlier” por busca e cutoff
- Execução em lote de múltiplas estimativas de uma vez, com uma interface fácil de usar
- "Explicação" gráfica em 3D do processo de estimação
- Relatório com matriz de krigagem, amostras e pesos
- Editor de parâmetros fácil de usar e assistente de parâmetros

CAPÍTULO 4 - CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA ESTUDADA

4.1 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA EM ESTUDO

O projeto Suruca está localizado no noroeste de Goiás, Brasil, próximo à cidade de Alto Horizonte, que se encontra a aproximadamente 350 km a noroeste de Brasília, a capital do Brasil. O projeto está distante de 6 km da Mina Chapada que é uma mina pertencente a mesma empresa dona do projeto Suruca que é a responsável pelos trabalhos de pesquisa do Projeto Suruca (Figura 12).

A mina Chapada é uma mina a céu aberto de ouro-cobre que está em produção comercial desde 2007. A capacidade anual da planta de flotação de Chapada foi aumentada para 22 milhões de toneladas em 2010, um aumento de 10 por cento em 2009 sendo 38 por cento maior do que o ritmo do estudo de viabilidade. No início de 2011, a planta da mina foi atualizada para manter o nível de aumento de produção para os próximos 15 anos com a integração da produção proveniente do depósito de ouro Suruca que está previsto entrar em operação em 2013.

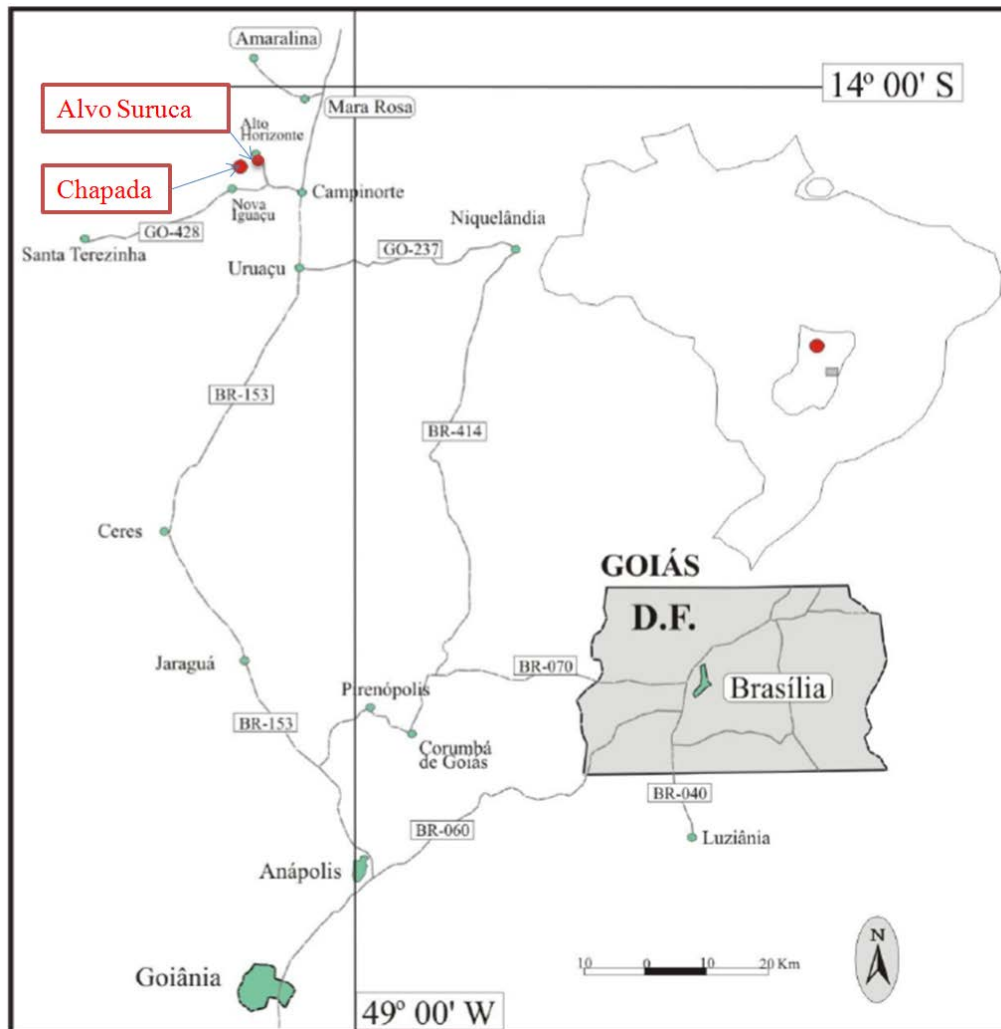


Figura 12 - Localização do Alvo Suruca (modificado de Oliveira, 2009)

4.2 GEOLOGIA REGIONAL

A área de Suruca está inserida no contexto geotectônico da Província Estrutural do Tocantins. A Província Tocantins é um sistema orogênico Neoproterozóico situado entre os crátons Amazônico, São Francisco e um terceiro, o Cráton do Paraná, hoje encoberto por rochas sedimentares da Bacia do Paraná, desenvolvido no contexto dos eventos colisionais que culminaram na amalgamação do supercontinente *Gondwana*. (Almeida *et al.*, 1977). Esta Província está subdividida e nesta subdivisão se encontra a Faixa Brasília, um cinturão orogênico que se distribui lateralmente na margem oeste do Cráton São Francisco

A figura 13 mostra o mapa geológico da província Tocantins.

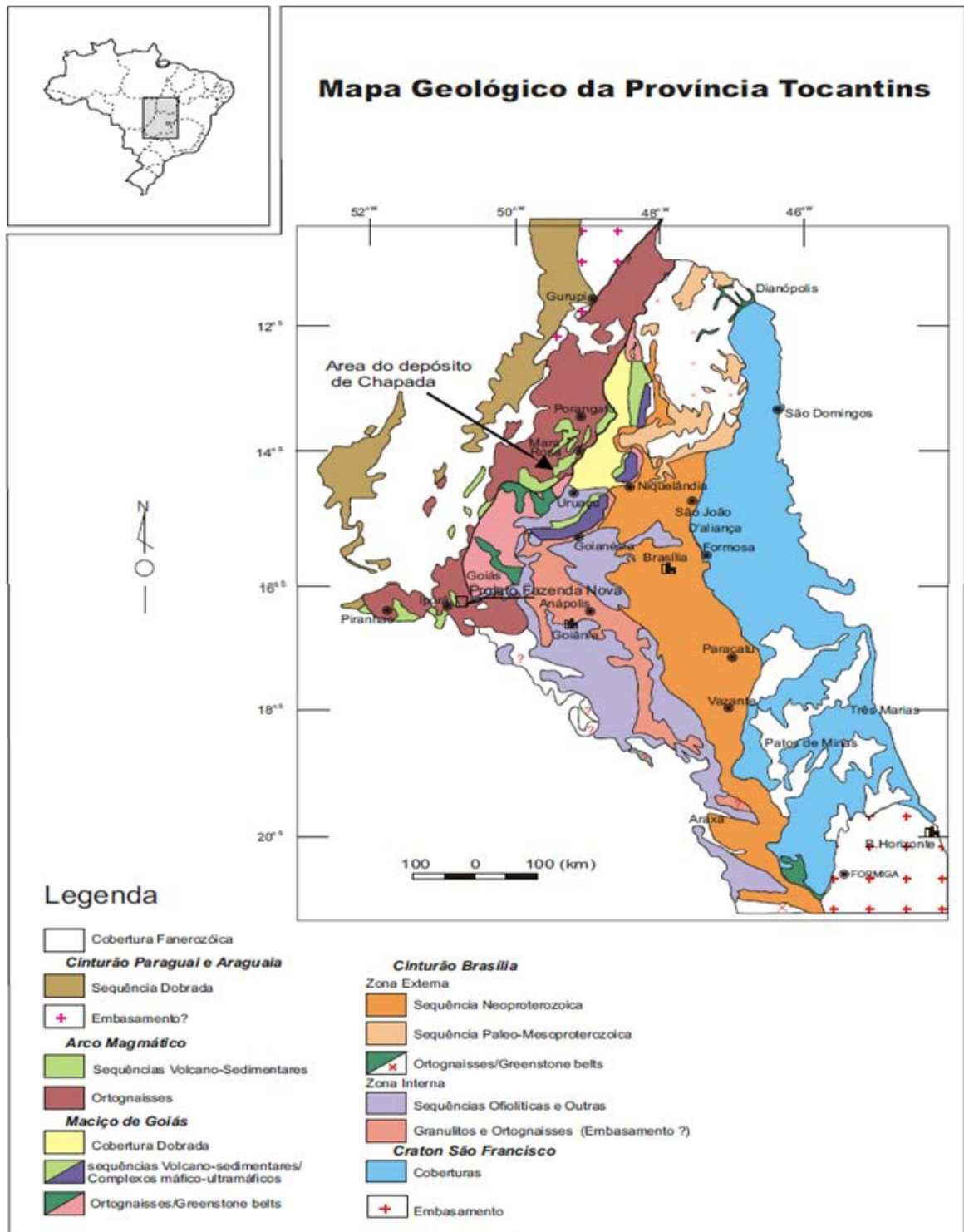


Figura 13 - Mapa geológico da província Tocantins (retirado de Cintra, 2003, modificado de Fuck et al. 1994 in Arantes et al., 1996)

O Arco Magmático de Goiás (AMG) é constituído por estreitas faixas vulcano-sedimentares, com direções estruturais variando entre NNW e NNE; separadas entre si por rocha metaplutônicas (Arantes et al, 1991), com idades em U/Pb de 900 até 641 Ma (Pimentel et al, 1997).

O AMG ocupa a porção mais ocidental da Faixa Brasília e se estende por mais de 1000 km a oeste e a norte do estado de Goiás, desde a região de Arenópolis e Bom Jardim de Goiás até Porangatu-Mara Rosa, indo até Tocantins, e desaparecendo sob a Bacia Fanerozóica Parnaíba. São reconhecidas duas importantes regiões de exposição de crosta juvenil neoproterozóicas, o Arco Magmático de Arenópolis, a oeste, e o Arco Magmático de Mara Rosa, a norte do estado de Goiás (Pimentel *et al.*, 1997). A maior parte do AMG é representada por rochas metaplutônicas dioríticas a graníticas que ocorrem expostas entre estreitas seqüências vulcano sedimentares típicas de arco de ilhas, com direções estruturais regionais NNE (Pimentel *et al.*, 2000).

4.2.1. Arco Magmático de Mara Rosa

Conforme apresentado por Cintra, 2003, a seqüência Mara Rosa foi definida originalmente por Ribeiro Filho (1981), como sendo formada por micaxistos e quartzitos feldspáticos, metamorfizados em condições de fácies anfíbolito a granulito.

O arco magmático de Mara Rosa consiste em extensos afloramentos de gnaisses cinza, portadores de hornblenda e biotita, com composição variando de diorita a predominante tonalítica, podendo apresentar também composições mais evoluídas, granodioríticas. Aos ortognaisses associam-se rochas supracrustais, geralmente expostas em faixas estreitas e alongadas, constituídas predominantemente por anfíbolitos e xistos variados, representando antigos depósitos de pelitos, arenitos e siltitos líticos (grauvacas) e rocha de origem química, como formações ferríferas bandadas e gonditos (Pires et al., 2007).

Importantes depósitos de Au e Cu – Au ocorrem hospedados nas rochas do Arco Magmático de Mara Rosa sendo caracterizados por quatro associações principais: Au-Ag-Ba, Depósito de Zacarias, Cu-Au, Depósito de Chapada, Au, Depósito de Posse e Au-Cu-Bi, ocorrência de Mundinho (Figura 14) (Oliveira *et al.*, 2000; 2004).

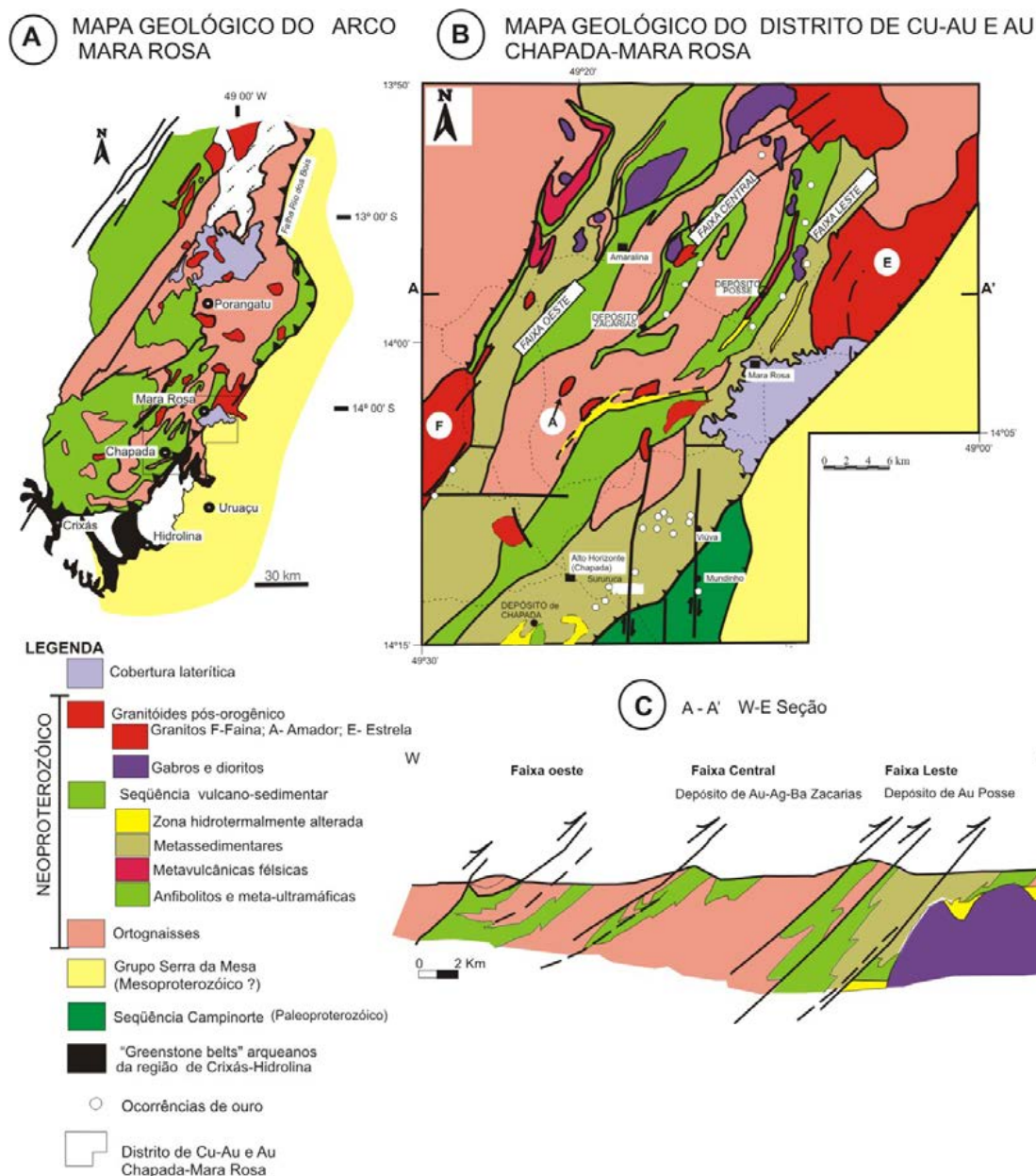


Figura 14 - (A) Mapa geológico esquemático do Arco Magmático de Mara Rosa. (B) Mapa geológico do distrito de Cu-Au e Au de Chapada-Mara-Rosa. (C) Perfil estrutural A-A'. (Modificado de Oliveira *et al.* 2004).

4.2.1.1.- Sequência Metavulcano-Sedimentar Campinorte

A Sequência Vulcano-sedimentar Campinorte, definida por Kuyumjian *et al.* (2004), é parte de um contexto inédito na literatura da região de Chapada-Mara Rosa, onde idades paleoproterozóicas eram até então desconhecidas, e inclui metapsamitos, metapelitos, lentes de gonditos e *metacherts*, e metavulcânicas ácidas de composição riolítica a riodacítica que comumente ocorrem como piroclásticas. Intercalações de

metaultramáficas, anfíbolito fino e epidoto anfíbolito são subordinados. O metamorfismo destas rochas atingiu fácies xisto verde e intrusões de tonalito, granodiorito e granito, provavelmente equivalentes plutônicos da Sequência Campinorte, também se apresentam metamorfisados nessa fácies. Determinações isotópicas Sm-Nd em metavulcânicas e metaplutônicas ácidas fornecem idade modelo (TDM) entre 2,30 e 2,52 Ga, sugerindo protólitos paleoproterozóicos.

Diagrama multielementar, gerado a partir de resultados analíticos de amostras representativas de anfíbolito, apresenta anomalias negativas de nióbio, indicativas de ambiente do tipo arco de ilha (Kuymjian *et al.*, 2004).

4.2.1.2. *Ortognaisses*

Os ortognaisses de composição tonalítica a diorítica expostos entre as sequências supracrustais do Arco Mágmató de Mara Rosa são rochas ricas em hornblenda, possuem granulação média a grossa e apresentam texturas plutônicas bem preservadas (Viana *et al.*, 1995).

Os ortognaisses tonalíticos (biotida gnaisses) de granulação média possuem tonalidade cinza claro a médio e é constituído essencialmente de plagioclácio, quartzo, biotita, feldspato potássico e, por vezes, hornblenda, com arranjo granoblástico.

Geoquimicamente, estas rochas possuem assinatura primitiva de caráter cálcico a cálcio-alcálico, similares a granitóides Tipo M de arcos insulares imaturos sendo a cristalização do protólito datada em aproximadamente 860 Ma (Pimentel *et al.* 1997). Dados de idades U-Pb em zircão mais recentes, entretanto, apontam dois episódios distintos para formação das rochas do arco: um em torno de 860 Ma e outro, aparentemente o estágio mais importante na evolução do arco em termos de volume de magma e fluxo de calor, por volta de 630 Ma (Junges *et al.*, 2003; Fuck *et al.*, 2006).

4.2.1.3. *Sequência Metavulcano-sedimentar Mara Rosa*

Oliveira (2009) dividiu a sequência Metavulcano-sedimentar Mara Rosa em três subunidades distintas – subunidade metavulcânica básica, subunidade metassedimentar e subunidade metalovulcano-sedimentar.

A Subunidade metavulcânica básica compõe-se de uma associação de metavulcânicas e metaplutônicas básicas, além de metassedimentares químicas e pelíticas subordinadas.

A Subunidade metassedimentar compreende uma associação de rochas psamo-pelíticas encaixantes do granito Faina. As faixas de rochas metassedimentares se dispõem em alto ângulo, ao longo de um corredor transcorrente NE.

A Subunidade metalovulcano-sedimentar compreende uma ampla variação de metavulcânicas básicas a ácidas e metassedimentos psamos-pelíticas e químicas, além de produtos hidrotermais associados às mineralizações de Cu-Au (Mina da Chapada) e Au (Mina de Posse).

No contexto geral, a Sequência Vulcano-sedimentar Mara Rosa, compreende anfibolitos e hornblenditos, microclínio gnaisses leucocráticos, biotita-plagioclásio gnaisses, cianita-sillimanita-muscovita xistos e/ou quartzitos e, mais raramente, *metacherts* com níveis grafitosos e talco xistos.

Dados U-Pb (zircão) de pequenos corpos alongados de granitos milonitizados da Mina de Ouro de Posse apresentam idade de cristalização de 632 ± 8 Ma, enquanto que titanitas do mesmo local possuem idade de metamorfismo de 632 ± 4 Ma (Pimentel *et al.*, 1997).

Os anfibolitos ou são toleíticos, ricos em Mg, Ni e Cr e similares a boninitos, ou são cálcio-alcálicos e, segundo Palermo (1996) e Palermo *et al.* (2000), os primeiros poderiam representar fragmentos de crosta oceânica, enquanto que os últimos são relacionáveis a magmatismo de arco.

Dados Sm-Nd de rochas metassedimentares da Sequência Vulcano-sedimentar Mara Rosa apresentam idades modelo (TDM) entre 0.9 e 1.2 Ga, indicando que a deposição dos sedimentos originais ocorreu em bacia oceânica, distante de fontes continentais antigas (Pimentel *et al.*, 1997, Junges *et al.*, 2002). Isócronas Sm-Nd em rocha total e granada, por sua vez, evidenciam dois episódios metamórficos. O primeiro, por volta de 760 Ma, sob condições de P-T mais elevadas, e o último, em torno de 600 Ma, sob condições P-T inferiores (Junges *et al.*, 2002).

10.2.1.4. Sequência Metavulcano-sedimentar Santa Terezinha

A Sequência Vulcano-sedimentar Santa Terezinha corresponde a uma grande estrutura arqueada com concavidade voltada para N-NE. O setor oeste desta estrutura é composto principalmente por rochas metassedimentares que incluem mica-xistos feldspáticos, quartzitos e muscovita xistos. Ao norte, formação ferrífera bandada apresenta-se associada a anfíbolito e muscovita biotita gnaiss de origem vulcânica. As porções sul e este, por sua vez, compreendem anfíbolitos, meta-andesitos e muscovita-clorita xistos com intercalações de material vulcânico (anfíbólio xisto, anfíbolito, biotita-muscovita gnaiss). Já a porção central é caracterizada por muscovita quartzitos sobrepostos por biotita gnaisses bandados, biotita xisto feldspático e clorita-muscovita xisto, além de uma variedade de rochas como muscovitaquartzito xisto, clorita xisto, formação ferrífera, gondito, magnetita quartzito e mica-xistos granadíferos. Incluem-se ainda magnetita-muscovita xisto e espessas camadas de talco xisto com esmeralda, clorita-anfíbólio-talco xisto, dolomita-talco xisto e biotitito (Fuck *et al.*, 2006).

Segundo Fuck *et al.* (2006), idades de 660-670 Ma, a partir de datação U-Pb (zircão), de rochas vulcânicas indicam que a Sequência Vulcano-sedimentar Santa Terezinha é cerca de 200 Ma mais jovem que a Sequência Vulcano-sedimentar Mara Rosa. Idades modelo Sm- Nd (TDM) de rochas vulcânicas desta sequência variam entre 0,8 e 1,9 Ga e valores $\epsilon_{Nd}(T)$ são positivos, entre 0 e +5. Entretanto, idades modelo Sm-Nd (TDM) de rochas metassedimentares apresentam uma gama mais ampla, entre 0,95 e 2,42 Ga. Idades modelo mais antigas e valores $\epsilon_{Nd}(T)$ negativos, entre -5,3 e -15,1, são mais comuns na porção oeste desta sequência indicando que fontes mais velhas, paleoproterozóica ou arqueana, junto a fontes neoproterozóicas do arco magmático, contribuíram na sedimentação da bacia precursora. Valores $\epsilon_{Nd}(T)$ menos negativos (-2,4) e positivos (+1,7 a +3,5), também foram obtidos indicando fontes oriundas do próprio arco magmático.

Ainda segundo Fuck *et al.* (2006), a separação desta unidade é feita em sete subunidades conforme apresentado no mapa geológico da Figura 15. A Figura 16 mostra uma legenda para o mapa geológico da Figura 15. O mapa mostra a predominância de certos tipos petrográficos ou associações de mais de um tipo petrográfico, e algumas unidades

separadas guardam grande semelhança entre si, não sendo descartada a possibilidade de representarem segmentos diferentes da mesma unidade.

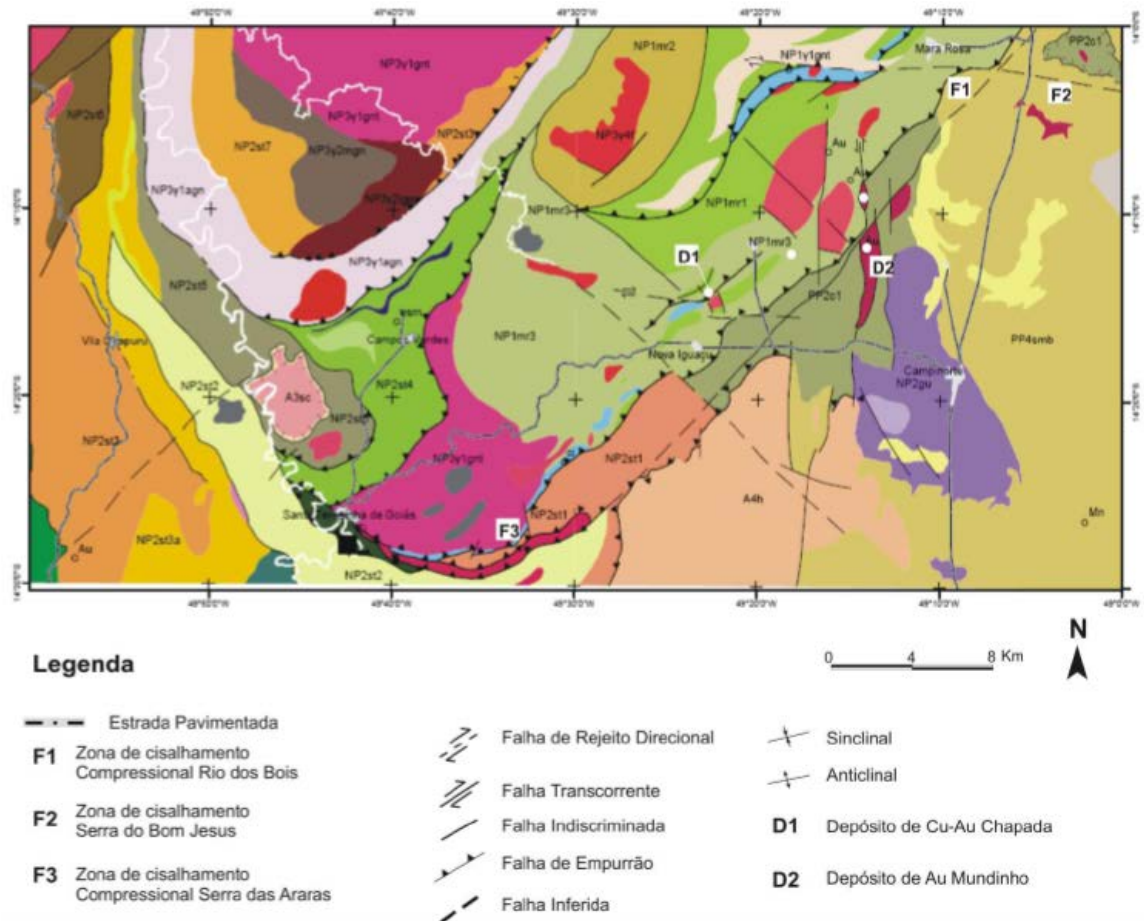


Figura 15 - Mapa Geológico da porção Sul do Arco Mara Rosa. (Retirado de Oliveira (2009), modificado de Oliveira et al. (2006) e Fuck et al. (2006))



Figura 16 – Legenda para o mapa geológico da porção Sul do Arco Mara Rosa apresentado na Figura 15

4.2.1.5. *Granitos tardi- a pós-orogênicos*

As rochas pertencentes às sequências vulcano-sedimentares e os ortognaisses do Arco Magmático de Mara Rosa, logo após o último evento deformacional, a cerca de 600 Ma, foram afetados pela intrusão de grandes plutons graníticos e pequenos corpos gabro-dioríticos (Pimentel *et al.*, 1996).

As intrusões graníticas mais representativas são os granitos Faina e Amador. Estes correspondem à biotita granitos e leucogranitos a duas micas, localmente com fácies granodiorítica. Os corpos gabro-dioríticos, intrusões estas menos volumosas que as graníticas, freqüentemente apresentam textura de mistura de magmas (Pimentel *et al.*, 1997).

Características peraluminosas e composição isotópica Nd inicial semelhante aos metassedimentos da Sequência Vulcano-sedimentar Mara Rosa, indicam que estes foram envolvidos na geração do magma parental. Além disso, a natureza bimodal do magma sugere que o calor necessário para o derretimento da crosta continental foi devido à presença de magma máfico sob a mesma (Pimentel *et al.*, 1996).

O granito Faina foi datado em 576 ± 6 Ma (Junges *et al.* 2002; 2003), enquanto as idades modelo Sm-Nd TDM se situam entre 1,1 e 1,5 Ga (Viana *et al.*, 1995). Amostra de diorito investigada apresentou idade modelo Sm-Nd TDM 1,04. (Junges *et al.*, 2002).

4.2.1.6 *Complexo Hidrolina*

Segundo Kuymjian *et al.* (2004), o complexo Hidrolina consiste de granodioritos com pouca variação textural e composicional, predominando granodiorito isótropo, médio a grosso, localmente foliado. Por vezes, exhibe foliação subvertical, controlada por zonas de cisalhamento, às quais se associa retrometamorfismo da associação mineral ígnea.

Enquanto o bandamento dos gnaisses não apresenta tendência bem definida, zonas de cisalhamento direcionais e fraturas dispostas segundo N-S, E-W e NW-SE se destacam na estruturação desse domínio. Subordinadamente ocorrem intrusões menores de metatonalito e metagranito, e freqüentes diques de metadiabásio.

Associado as feições de baixa intensidade de deformação, tais como protofoliação milonítica anastomosada e cataclase incipiente, ocorre retrometamorfismo da associação

mineral ígnea, onde plagioclásio e feldspato potássico são transformados em fengita, enquanto biotita em clorita (chamosita). Essas transformações são diagnósticas de metamorfismo incongruente de fácies xisto verde.

Os gnaisses granodioríticos são representados por variações de leucognaisses a biotita gnaisses de granulação média e tonalidades de cinza clara a médio, exibindo foliação difusa ou bandamento milimétrico a centimétrico evidenciado pela alternância de bandas quartzo-feldspáticas e bandas constituídas em maior proporção de biotita. Os gnaisses mostram-se recortados por vênulas e veios quartzo-feldspáticos, por vezes graníticos, de granulação fina até pegmatítica. Nos domínios de maior intensidade de deformação, estas estruturas tendem a se paralelizar ao bandamento gnáissico. São comuns nestas rochas feições de migmatização e segregação metamórfica.

O complexo Hidrolina é definido por estrutura dômica batolítica ligada à evolução arqueana dos *greenstone belts* de Crixás-Hidrolina. No entanto, datação de gnaisse granodiorítico deste complexo na folha Campinorte mostrou idade U-Pb em zircão de 2,315 Ga, interpretada como de cristalização ígnea. Isto sugere que o complexo Hidrolina teve evolução magmática polifásica, contando inclusive com a participação de evento paleoproterozóico de atuação pouca conhecida na região.

4.2 Atividade de Pesquisa desenvolvidas

Os trabalhos de pesquisa realizados no Alvo Suruca constaram de levantamento topográfico, mapeamento geológico sistemático, levantamento geofísico (IP Terrestre e Aeromagnetometria), petrografia e atividades de prospecção envolvendo geoquímica de sedimentos de corrente, amostragem de solo, amostragem de rocha, amostragem de canal e a execução de campanha de sondagem diamantada e sondagem RAB.

4.3 Geologia Local

No contexto geológico local as rochas supracrustais da sequência metavulcano-sedimentar de Mara Rosa são individualizadas em três faixas de direção NNE. Estas faixas que são designadas como faixas leste, central e oeste e são separadas umas das outras por ortognaisses. Todas as faixas são compostas de metabasaltos, metatufos intermediários e félsicos, metagrauvaca de granulação fina, granada-mica xistos, metacherts, formação ferrífera, quartzitos e rochas mataultramáficas.

No contexto da sequência metavulcano-sedimentar de Mara Rosa, o distrito Chapada-Suruca está inserido na faixa leste. Arantes et al (1991) definiram a faixa leste na região de Mara Rosa composta por rochas metavulcânicas e metassedimentares divididas da base para o topo dentro de quatro unidades:

Unidade Amaro Leite: Representado por um pacote espesso de metassedimentos, predominantemente metagrauvas intercaladas com tufos máficos.

Unidade Araras: Dominantemente composta de metatufos máficos a intermediários com intercalações subordinadas de metagrauvas, metavulcânicas félsicas e cherts. A espessura desta unidade atinge 1300 metros.

Unidade Pose: Composta predominantemente por metatufos, metalapilli-tufos de composição riolítica, exibindo textura gnáissica. Esta unidade tem aproximadamente 400 metros de espessura.

Unidade Carambolas: Consiste de uma sequência de rochas metavulcânicas máficas e metatufos intercalados com rochas metavulcânicas intermediárias, e o pacote tem uma espessura de aproximadamente 1200 metros.

A faixa leste da região de Chapada-Suruca compreende um pacote espesso de anfibolitos sucedidos por rochas vulcânicas e vulcanoclásticas e no topo rochas metassedimentares.

As seqüências metavulcano-sedimentares são intrudidas por rochas metaplutônicas de composição diorítica a quartzo-diorítica e também podem ser relacionados aos granitóides tipo-M de arcos de ilha imaturos. Estas intrusões são associadas com fluídos magmáticos responsáveis pela mineralização Cu-Au e Au e foram também formadas pela alteração hidrotermal. Um corpo tardi-tectônico é representado pelo Diorito estéril e pouco deformado no sudeste da mina de Chapada.

Granitos pós-tectônicos são representados por pegmatitos que são exclusivos da Mina de Chapada. Dados de U-PB forneceram idades de 884.9 ± 9.4 Ma para Cianita-Epidoto-muscovita-biotita xisto feldspático, que representa a idade de cristalização das rochas vulcânicas, considerada o protólito da associação de rochas metavulcano-sedimentares,

e uma idade de 864.9 ± 5.6 Ma para Biotita-Gnaisses, correspondendo para a idade de cristalização dos protólitos ígneos. A Figura 17 mostra um mapa geológico que compreende a região da Mina de Chapada e da Cava planejada para Suruca.

Conforme já mencionado, o depósito Cu-Au de Chapada compreende produtos de alteração hidrotermal de um sistema pórfiro de Cu-Au. Estas alterações são:

-Biotitização (Potassificação) representado por Biotita xistos, Biotita microclina contendo gnaisses.

-Sericitização representado por Pirita-quartzo-sericita xistos.

-Alteração argílica avançada representada por Cianitas contendo xistos e Cianita-quartzitos.

-Propilitização sendo produto da alteração propilítica e caracterizada por rochas ricas em epidoto (Epidositos).

Alem disso rochas inalteradas representadas por anfibolitos com afinidade calcialcalina, vulcanoclásticas representadas por Granada-biotita xisto, Estauroлита-silimanita-biotita xisto, Muscovita xisto, Biotita-muscovita xisto e Metagrauvas.

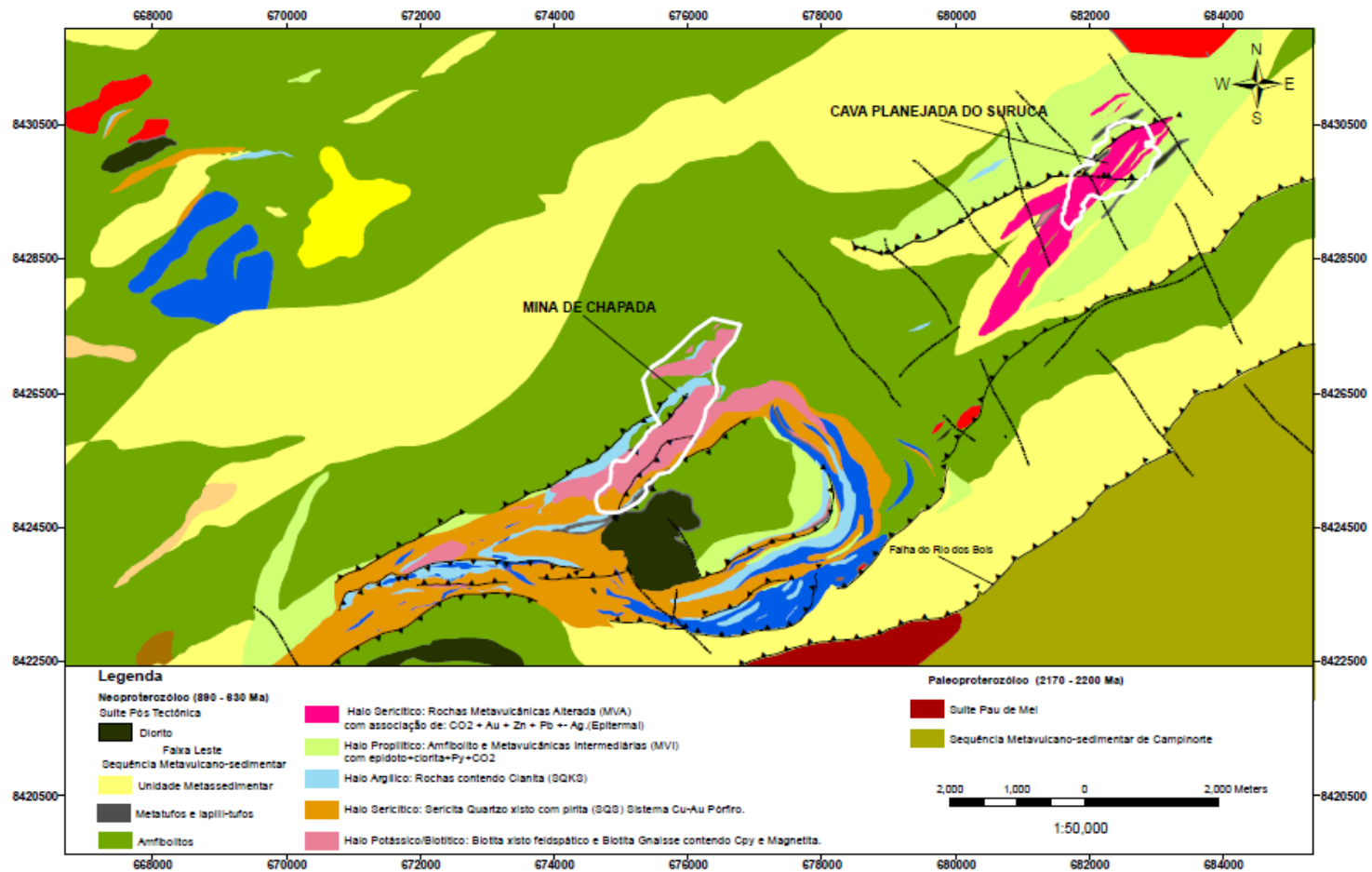


Figura 17 - Mapa geológico da região de Chapada-Suruca com a localização da Cava de Chapada e a Cava desenhada do Suruca (Relatório interno da Yamana)

4.4 Geologia do Depósito

O Alvo Suruca foi agrupado da base para o topo como: Anfibolito (ANF), Rochas Metavulcânicas Intermediárias (MVI) e Metassedimentos (MTS). Existem muitas intrusões de Quartzo Diorito Pórfiro (QDP) que ocorrem preferencialmente nas rochas Metavulcânicas Intermediárias (MVI) e nos Metassedimentos (MTS) (Figura 18). A alteração hidrotermal overprints (sobrepõe) as litologias e é caracterizada por halos internos e externos.

- i) O Halo interno ocorre nas rochas intermediárias, metassedimentos e dioritos com forte e penetrante alteração sericítica, onde passam a serem caracterizadas como Rochas Metavulcânicas Alteradas hidrotermalmente (MVA).
- ii) O Halo externo é caracterizado pelo halo propilítico que ocorre principalmente nos anfibolitos.

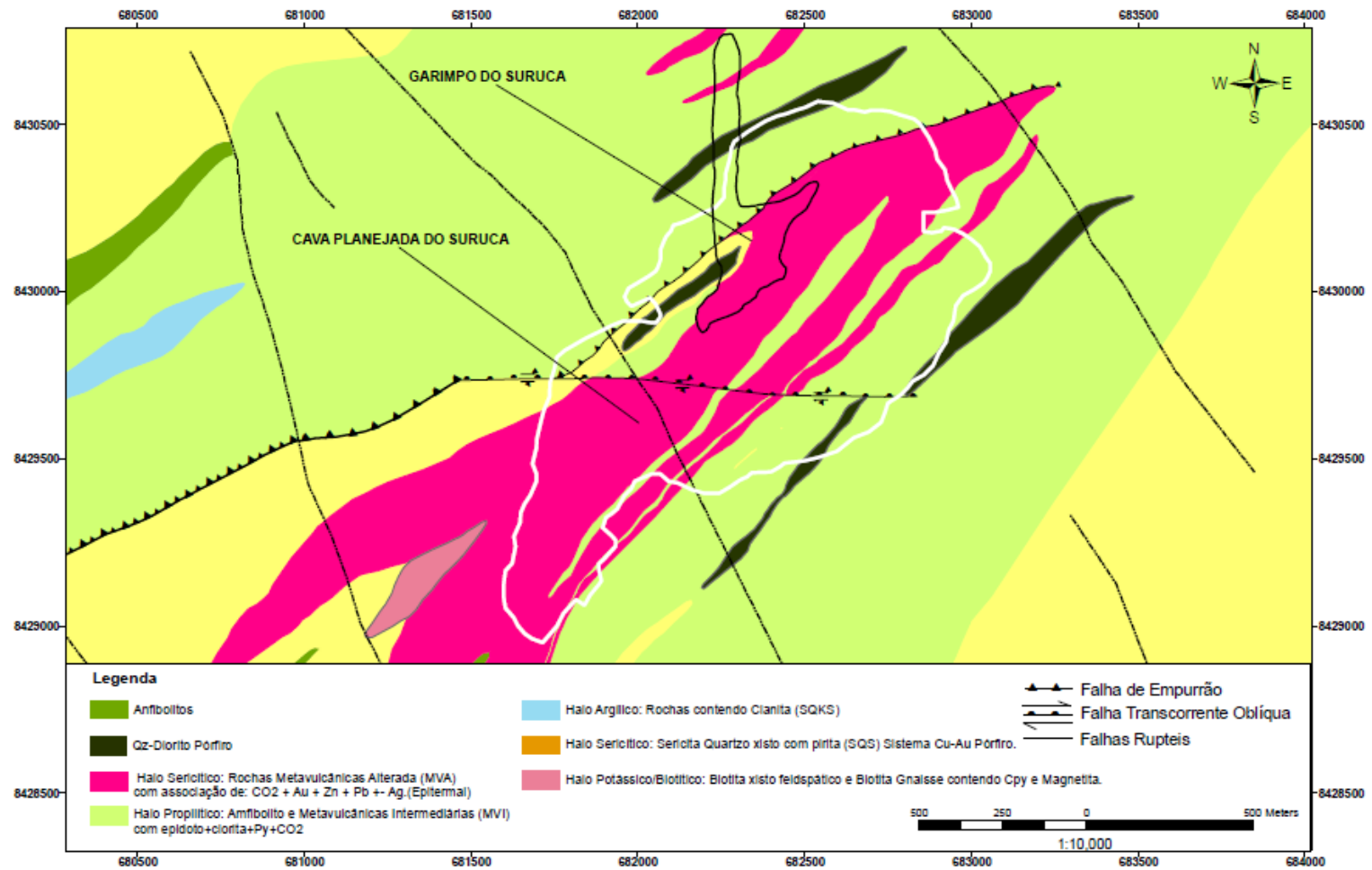


Figura 18 - Mapa Geológico do Alvo Suruca (retirado de relatório interno da Yamana).

As unidades litológicas Anfibolitos (ANF), Metavulcânicas Intermediárias (MVI), Metassedimentos (MTS), Quartzo Diorito Pórfiro (QDP) e Metavulcânicas Alteradas (MVA) do Alvo Suruca são caracterizadas como a seguir:

Anfibolitos (ANF): Os Anfibolitos representam rochas Metavulcânicas Máficas caracterizadas pelos seguintes termos geológicos: Anfibolitos; Granada-Anfibolitos ;Quartzo-Anfibolitos e Horneblenda-Quartzo-Epidositos. Eles são apresentados com uma granulação fina-média, esverdeado e freqüentemente com um Gnaiss bandado e/ou uma textura nematoblástica.

Metavulcânica Intermediária (MVI): Rochas metavulcânicas Intermediárias são caracterizadas por Anfibólio-Biotita Gnaiss, Anfibólio-sericita-xisto, Muscovita-epidoto-biotita-xisto, Granada-epidoto-quartzo-muscovita-xisto. Em geral esta unidade está associada ao halo propilitico que gera uma cloritização e epidotização pervasiva, com forte sericitização.

Metassedimentos (MTS): Rochas Metassedimentares são caracterizadas por Granada-biotita-xisto ou Granada-biotita-epidoto-muscovita-quartzo-xisto. Estas rochas foram possivelmente rochas pelíticas ou psamo-pelíticas. Esta unidade pode ser sobreposta pelo halo hidrotermal sericítico ou propilítico.

Quartzo Diorito Pórfiro (QDP): Caracterizado por Quartzo Diorito pórfiro intrusivo, pode ocorrer com textura isotrópica ou cisalhada. O Quartzo Diorito cisalhado perde as feições ígneas e é representado por xisto milonítico com forte sericitização e sulfetação. O Quartzo Diorito pórfiro é geralmente relacionado para a alteração propilítica.

Metavulcânicas Alteradas (MVA): Rochas Metavulcânicas alteradas são caracterizadas por Carbonato-muscovita-clorita-xisto, Plagioclásio-biotita-quartzo-xisto, Carbonato-epidoto-muscovita-quartzo-xisto, Albita-muscovita-quartzo-carbonato-epidoto-xisto. Todas estas rochas apresentam um alto conteúdo de sulfetos representado por pirita, galena, esfarelita e calcopirita. Esta unidade é produto de alteração hidrotermal de rochas metavulcânica intermediária (MVI) ou quartzo diorito cisalhado (QDP).

4.5 Estratigrafia

Na estratigrafia da região de Suruca-Chapada no topo da coluna estratigráfica ocorre uma espessa camada de metassedimentos e na Mina de Chapada ocorrem Tufos e Lapilli-tufos. Todas essas rochas são cobertas por um espesso (média de 30m) perfil laterítico. O perfil laterítico é representado por um típico terreno laterítico imaturo, que foi subdividido da base para o topo em: Saprolito Grosso, Saprolito Fino, Zona Mosqueada ou Zona Argílica, Crosta Laterítica e Solo Pisolítico (produto de alteração da crosta laterítica). Da base para o topo a estratigrafia é classificada como: Anfibólito (ANF), Rochas Metavulcânicas Intermediárias (MVI) e Metassedimentos (MTS), com intrusões de Quartzo Diorito Pórfiro (QDP) que ocorrem preferencialmente nas rochas Metavulcânicas Intermediárias (MVI) e nos Metassedimentos (MTS).

4.6 Mineralização e alteração hidrotermal

A mineralização no distrito de Chapada-Suruca é atualmente interpretada como um sistema Pórfiro e Epitermal associado ao estágio de Arco de Ilha (864 Ma) sobreposta pela remobilização dos fluidos orogênicos durante os eventos do Brasiliano (630 – 580 Ma). Três distintas mineralizações separam o sistema Pórfiro e Epitermal baseados no estilo da alteração hidrotermal e associação metálica:

- i) Sistema Cu-Au Pórfiro representado pela mina de Chapada.
- ii) Sistema HS, Au com alta sulfetação representada pelo alvo Hidrotermalito.
- iii) Sistema IS, Au (Ag-Pb-Zn) com sulfetação intermediária sendo representada pelo Infoalvo Suruca.

O mergulho da mineralização varia entre 20 e 30° NW e é controlado pela foliação principal S1.

A alteração hidrotermal no minério sulfetado está associada aos Halos Sericítico e Propilítico.

A proporção é aproximadamente de 44% no Halo Sericítico e de 37% no Halo Propilítico. A alteração sericítica é caracterizada por sericita, mais ou menos biotita e carbonato com pirita, galena, esfalerita e algumas calcopirita. A alteração propilítica é caracterizada por epidoto, clorita, carbonato e pirita.

Há grandes indícios de que grande parte da mineralização esteja contida no Halo sericítico e na alta porção do Halo Propilítico, indicando uma forte evidência de que o sistema Au-Zn-Ag foi remobilizado por fluídos epigenéticos ao longo das estruturas. Os dois tipos de minérios têm as seguintes feições: O sericítico pode ser relacionado ao Zinco, mas os altos valores de ouro sempre têm um envelope de zinco. O halo propilítico tem uma relação direta entre o ouro e o zinco. O Alvo Suruca foi submetido a um forte metamorfismo e deformação que causou a remobilização de Au, Ag e Zn.

Valores de alto teor de ouro são relacionados para veios e vênulas de quartzo dobrado com alteração sericítica e biotítica, em vez de amostras com altas concentrações de sulfetos dando evidências de que a principal mineralização é pré-deformada fazendo com que o alto teor de ouro permaneça em feições epitermais e não associados a um controle estrutural. A segunda geração de veios e vênulas de quartzo com sulfetos (esfarelita + galena + pirita), carbonatos e epidotos mostra teores intermediários.

CAPÍTULO 5 - RESULTADOS

5.0 BANCO DE DADOS SURUCA

Toda e qualquer informação (descritivas, quantitativas e qualitativas) de uma área de estudo envolvida numa pesquisa mineral é registrada na forma de anotações, tabelas, desenhos, amostras e etc. Normalmente, esses dados são armazenados em banco de dados contendo todas as informações essenciais para a exploração mineral (Ferreira, 2006).

Como o objetivo final de uma pesquisa mineral é provar a exequibilidade do empreendimento ou utilizar durante a etapa de planejamento de mina, o banco de dados é alimentado e atualizado durante todo o processo mineiro (pesquisa, desenvolvimento, lavra e exaustão).

Essas informações correspondem normalmente à descrição e análise de furos de sondagem, canaletas, trincheiras, perfis geofísicos, poços de pesquisa e etc. Todas essas formas de informação têm pelo menos um único objetivo: avaliar ao máximo, por diversos métodos de estimativa, as condições reais do depósito mineral (Ferreira, 2006).

Dentre os diversos tipos de informação, destaca-se a posição geográfica e altimétrica (X, Y e Z) e a configuração físico-química do método de amostragem – sondagem, perfilagem, amostras de solos e etc. Com essas informações, os técnicos já podem pelo menos ter uma idéia de um volume inicial e do que podem esperar durante a pesquisa, além de como detalhar essa pesquisa para aumentar o nível de conhecimento de um depósito mineral.

O banco de dados do Depósito Suruca é composto por todas as informações decorrentes dos trabalhos de exploração ora desenvolvidos, constando dos dados de:

- Geoquímica de Sedimento de Corrente/Concentrado de Bateia
- Geoquímica de Solo
- Geoquímica de Rocha
- Mapeamento Geológico/Estrutural

- Campanha de Sondagem Rotativa Diamantada

Para as distintas fases da campanha geoquímica o Banco de Dados foi alimentado com informações relativas a posicionamento (coordenadas UTM), descrição pormenorizada e resultados analíticos. Já para a campanha de sondagem, foram inseridos no Banco de Dados as seguintes informações, que são agrupadas em seis tópicos principais:

- Collar: Consiste nos dados de: coordenadas UTM da boca do furo de sondagem após a perfuração;
- Survey: Informações sobre a direção e inclinação do furo de sondagem;
- Assay: Contempla dados dos intervalos das amostras, número das amostras e teor;
- Lito: Contém informações dos tipos de rochas descritos durante a descrição dos furos;
- HA: Descrição do tipo de alteração da rocha descrita;
- Oxisulp: Descrição do tipo de rocha oxidada.

O Banco de dados de sondagem utilizado contempla furos feitos entre 2008 até Setembro de 2010, sendo um total de 149 furos e 27950 metros perfurados, a uma malha aproximada de 100m x 100m.

Na tabela 3 são apresentadas às codificações utilizadas para representação dos diferentes tipos de rochas e assembléia mineral de alteração hidrotermal.

Tabela 3: Códigos utilizados para as litologias encontradas no Projeto Chapada

Oxidação	Código para rochas oxidadas		Alteração	Código
Oxidado : 1	1	Solo e Laterita	Inalterado	0
Mix : 2	2	Zona Mosqueada	Propilítica	1
Sulfetado : 3	3	Saprolite	Argílica	2
	4	Coarse Saprolite	Sericítica	3
			Potássica	4
Sulfetos	Código	Porcentagem (%)	Tipos de Sulfetos	
Ausente ou traços	0	0 – 0.1	Py (Pirita)	Po (Pirrotita)
Fraco	1	0.2-1.0	Cp (calcopirita)	Bn (Bornita)
Moderado	2	1-2.5	Es (Esfarelita)	
Forte	3	> 5	Ga (Galena)	

Códigos de Rochas			
BSS	126	BKS	36
GRT	121	BFS (BXF)	10
SQZT/KQZT	123	MTF	100
SQS	110	QDP	119
AQS (ANX)	30	ANF	60
SKAO	124	PEG	80
SQKS	50	BCH	115
CLS	120	MVI	129
ANFp	114	MVA	125
TON	130	MGB	128
MTS	127	MVU	131
VQZ	20	DAC	132

Consistência		
Rocha	Código	Exemplo
Muito competente	4	SQZT,KQZT, ANF , ANFp, QDP,GRT
Competente	3	MTF,SQKS,AQS,MVA,MVI,BKS,MTS,SQS
Moderada	2	BTO, BSS, BCH
Friável	1	SAP ,SOIL , GNS e SKAO

Ensaio de densidade são realizados de forma a se determinar a densidade média dos principais tipos litológicos existentes.

Em cada furo de sondagem é selecionado um quarto das amostras em cada halo de alteração para se determinar a densidade da rocha. A densidade média dos principais tipos litológicos está apresentada na tabela 4:

Tabela 4: Densidade media dos principais tipos litológicos do Alvo Suruca

Litologia	Densidade(g/cm ³)
SOLO	1.34
ZONA MOSQUEADA	1.40
SAPROLITO FINO	1.62
SAPROLITO GROSSO	2.21
ANFP	2.90
ANF	2.92
QDP	2.88
MVA	2.87
MTS	2.88
MVI	2.89

O banco de dados foi obtido em arquivo do tipo CSV (separado por vírgula) e estavam em cinco arquivos separados, contendo todas as informações da campanha de sondagem citada anteriormente. Em seguida este arquivo foi importado para o software Vulcan.

Como o software Vulcan é de origem Australiana, toda informação de entrada de dados, assim como resultados entregues por ele, segue os padrões de separador de casa decimal e separador de milhar que obedecem conforme fonte Australiana. Dessa forma, a casa decimal é separada por um ponto (“.”) e o espaço é o separador de milhar.

5.1. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1.1 Validação do banco de dados e análise estatística dos dados

A validação de banco de dados é de extrema importância, pois é a forma de verificar se os dados que serão utilizados para posterior avaliação de um depósito, não possuem valores que não estão de acordo com os obtidos, verificando erros de entrada de novos dados, valores perdidos, entre outros e diminuindo a margem de erro gerado durante o processo de geração do modelo.

Existem diversas metodologias e formas para se fazer a validação de banco de dados. O software Vulcan disponibiliza uma ferramenta chamada “Validate” que possui um grande número de opções para se realizar a validação de bancos de dados de sondagem que também serve para verificar se a importação de dados externos ocorreu

corretamente. As opções de validação utilizadas foram às consideradas de maior relevância para este estudo e que se encontram disponíveis dentro da ferramenta:

- “Unique Collar Location”: Verifica se não há mais de um furo contendo a mesma coordenada de boca de furo. Esta validação foi feita em 2D e em 3D.
- “Collar on Surface”: Verifica se as coordenadas da boca dos furos se encontram na mesma cota da superfície topográfica da região onde foi realizada a sondagem.
- “Empty Table”: Verifica se existe alguma tabela vazia no banco de dados.
- “Total Depth”: Compara e verifica se a profundidade final dos furos é igual em todas as tabelas selecionadas.
- “Overlapping Intervals”: Verifica se existem intervalos de amostragem sobrepostos, para prevenir que um mesmo intervalo não tenha dois valores para uma mesma informação.

Todos os furos contidos no banco de dados passaram nos testes de validação, sendo que todos foram utilizados para os trabalhos feitos neste estudo.

5.1.2 Estatística descritiva das Variáveis

A análise exploratória ou análise estrutural dos dados amostrais consiste de cálculos estatísticos cujo objetivo é detectar tendências de agrupamento, dispersão ou correlação entre as variáveis (Isaaks & Srivastava, 1989).

Segundo Ferreira (2006), a análise estatística é feita com o objetivo de caracterizar e descrever estatisticamente as distribuições dos dados, para um melhor entendimento do comportamento das variáveis de interesse dentro do depósito.

Para tal caracterização são utilizadas medidas de tendência central, que são a média e medidas de dispersão em torno dela que são: a variância, o desvio padrão e o coeficiente de variação, entre outros.

Foi realizada uma análise (estatística básica) de forma a incorporar todo o banco de dados sem restrições e em seguida separado por tipos de alteração diferente e tipos de rocha oxidada que compõem o banco de dados. As tabelas 5 a 7 mostram os resultados

da estatística básica para o banco de dados completo, separado para cada tipo de alteração e para cada tipo de oxidação.

Tabela 5: Estatística geral para o teor de ouro para o banco de dados de sondagem

	Au (g/t)
Número amostras	11780
Mínimo	0
Máximo	77
Média	0.33
Desvio Padrão	1.28
Percentil 25%	0.08
Percentil 50%	0.15
Percentil 75%	0.30
Percentil 90%	0.61

Tabela 6: Estatística geral para o teor de ouro para os diferentes tipos de alteração

	Inalterado	Propilítica	Sericítica	Potássica
Número amostras	2303	4651	4675	151
Mínimo	0	0	0	0
Máximo	77	33.2	48.9	18.1
Média	0.34	0.25	0.38	0.39
Desvio Padrão	1.88	0.81	1.23	1.56
Percentil 25%	0.08	0.05	0.09	0.06
Percentil 50%	0.16	0.11	0.18	0.12
Percentil 75%	0.28	0.24	0.35	0.29

Tabela 7: Estatística geral para o teor de ouro para os diferentes tipos de oxidação

	Solo e Laterita	Zona Mottled	Saprolito
Número amostras	2054	177	8879
Mínimo	0	0.02	0
Máximo	77	2.48	48.9
Média	0.36	0.27	0.33
Desvio Padrão	1.98	0.36	1.08
Percentil 25%	0.09	0.09	0.07
Percentil 50%	0.17	0.15	0.15
Percentil 75%	0.28	0.27	0.31

Os números totais de amostras com classificação de oxidadas e o número total de amostras com classificação de alteração não coincidem pois nem toda amostra foi determinado com um tipo de oxidação.

Pode-se verificar claramente que os tipos de alteração propilítica e sericítica são a grande maioria no depósito; enquanto que para as oxidações, o saprolito representa a grande maioria.

Como os resultados da estatística geral mostram que cerca de 90% das amostras do banco de dados se encontram com valor de ouro inferior a 0.6 g/t, como forma de melhor analisar a distribuição dentro do banco de dados, foram gerados histogramas separados para os tipos de alteração diferente e também para os diferentes tipos de rocha oxidada, não utilizando as amostras que contém teor de ouro superior a 0,6 g/t. Os resultados estão apresentados nas Figuras de 19 a 26.

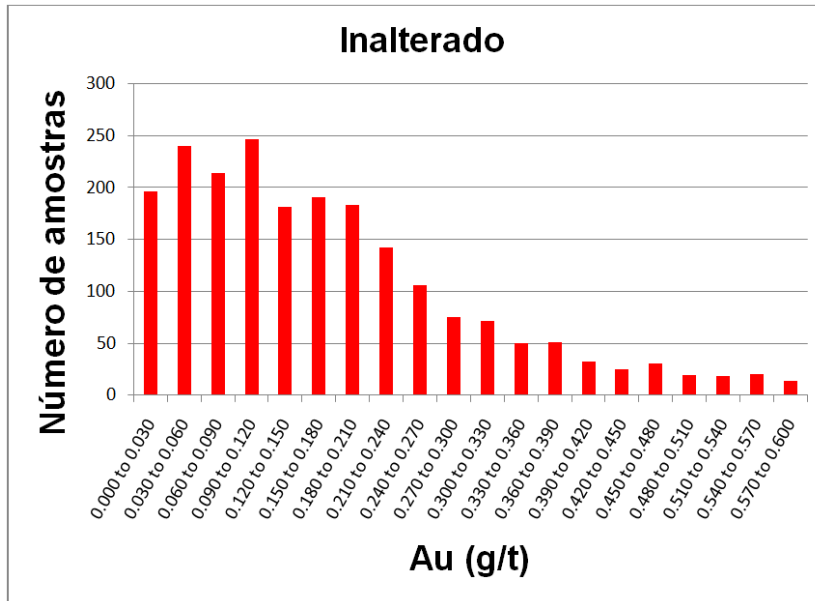


Figura 19 - Histograma do teor de ouro para as rochas inalteradas

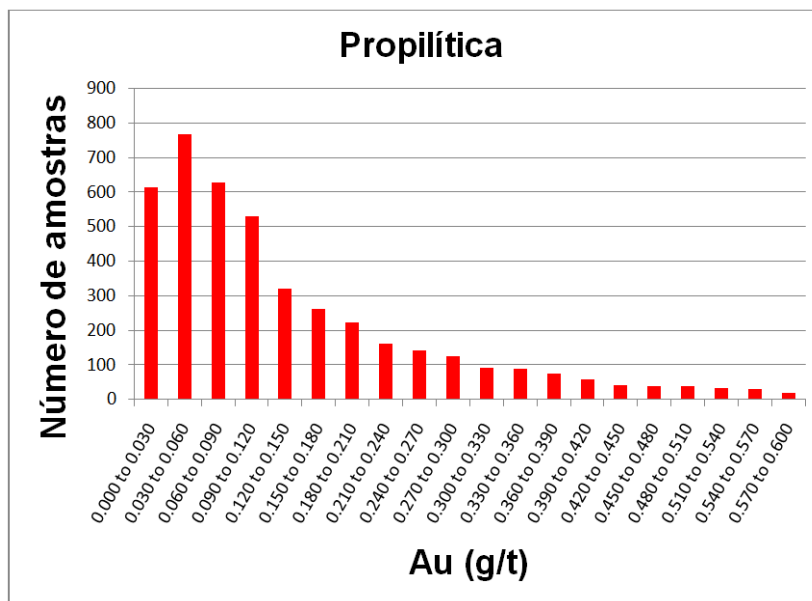


Figura 20 - Histograma do teor de ouro para a alteração propilítica

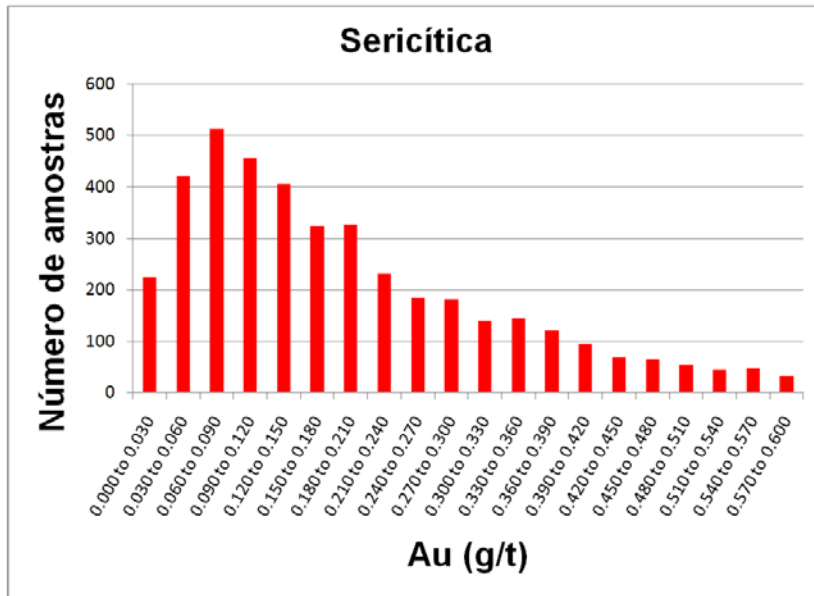


Figura 21 - Histograma do teor de ouro para a alteração sericítica

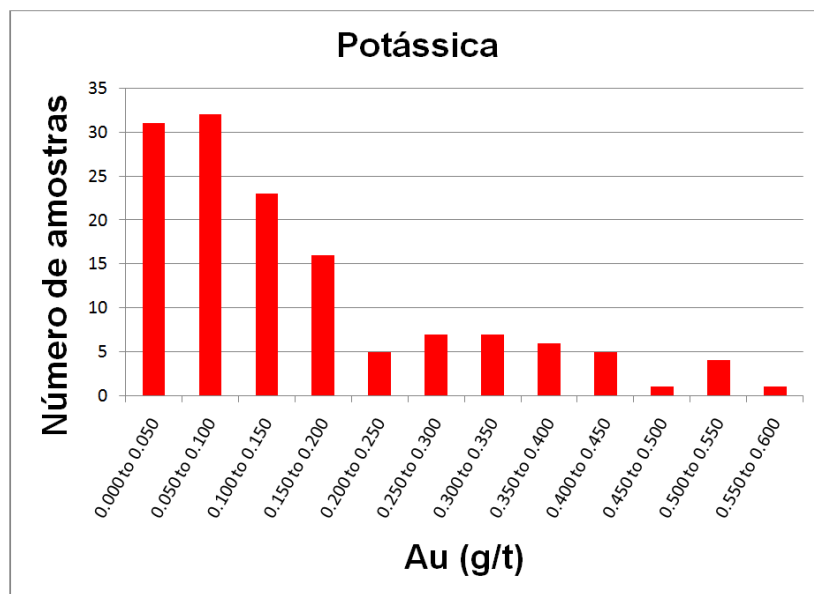


Figura 22 - Histograma do teor de ouro para a alteração potássica

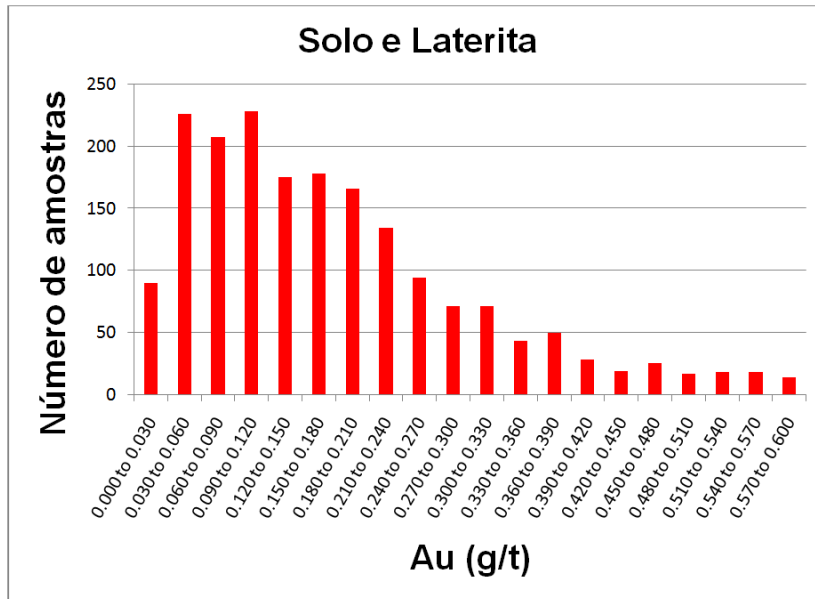


Figura 23 - Histograma do teor de ouro para o solo e laterita

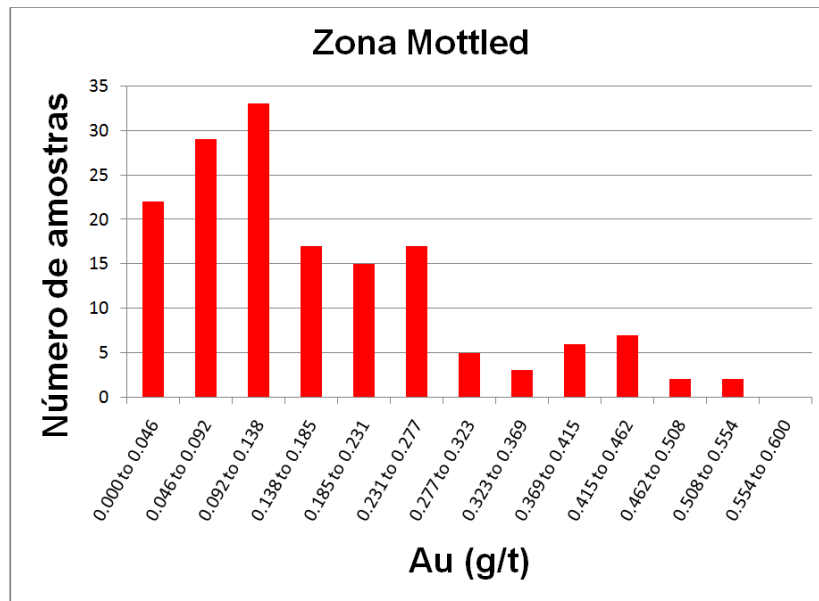


Figura 24 - Histograma do teor de ouro para a zona mottled

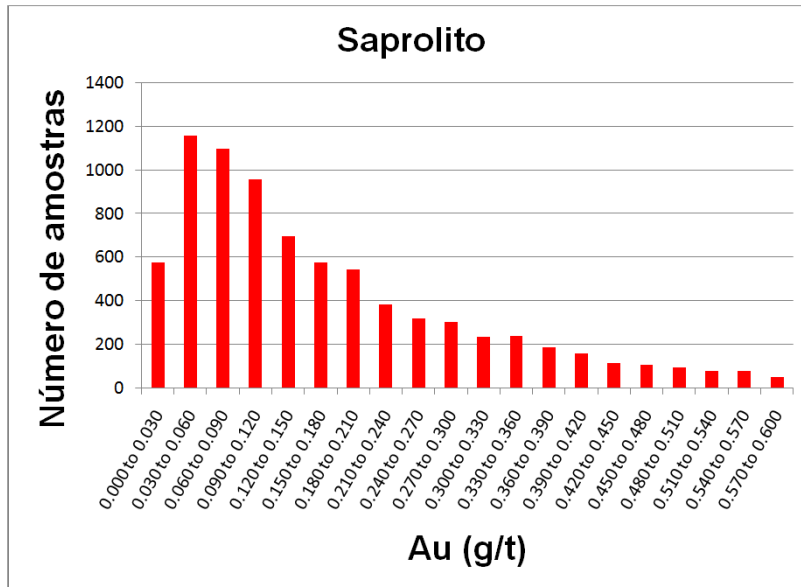


Figura 25 - Histograma do teor de ouro para o saprolito

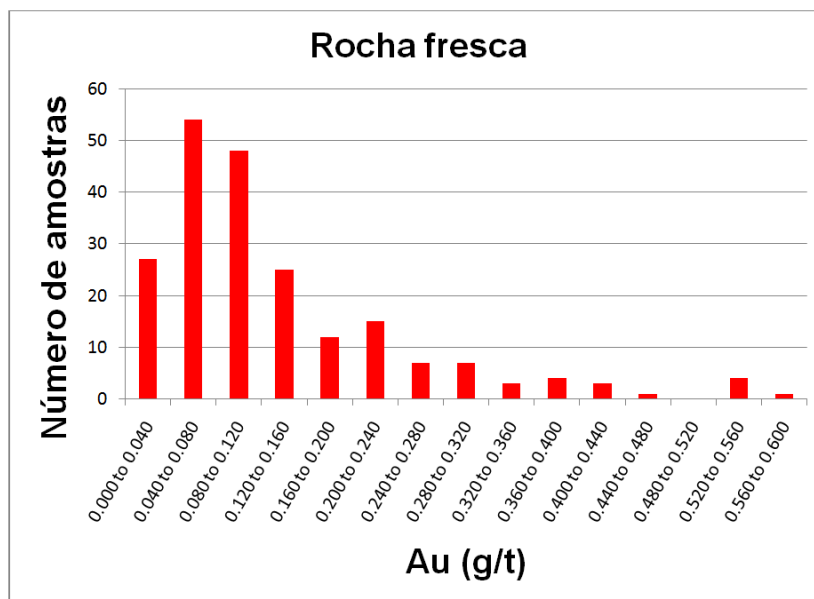


Figura 26 - Histograma do teor de ouro para a rocha fresca

Pode-se observar nos histogramas acima, que a maioria das amostras possui um teor de ouro de inferior a 0,1 g/t e que o número de amostras com teor superior a 0,1 g/t começa a diminuir cada vez que o teor aumenta.

Verifica-se também que entre os tipos de alteração, a propilítica e a sericitica dominam em quantidade de amostras dentro do banco de dados. Conforme os gráficos, a alteração

propilítica possui maior quantidade de amostras analisadas, porém na alteração sericítica há maior quantidade de amostras com teores mais elevados.

Já para os tipos de oxidação observa-se que o saprolito possui maior quantidade de amostras em relação aos outros tipos de alteração além de englobar a grande maioria das amostras de alto teor.

5.1.3 Geração da superfície topográfica

A superfície topográfica da região foi gerada a partir da triangulação de pontos com coordenadas conhecidas. Estes pontos foram obtidos a partir das coordenadas dos furos de sondagem e também de diversos outros pontos obtidos por levantamento topográfico tradicional de forma a melhor representar a área em estudo.

Os pontos levantados foram importados para o software Vulcan e foi gerada uma superfície triangularizada tridimensional de forma a representar a superfície topográfica da região conforme mostrado na Figura 27.

Curvas de isovalores de cota foram geradas como forma de melhor interpretação das cotas da região (Figura 28).

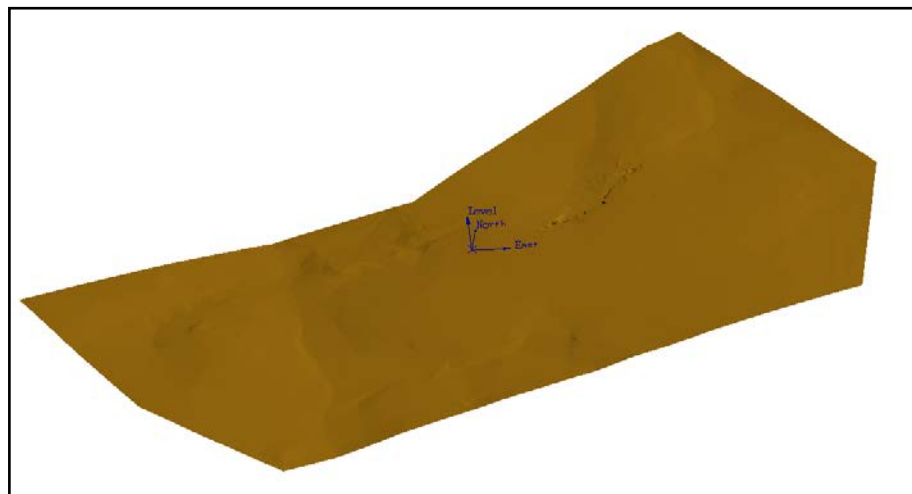


Figura 27 - Triangulação rotacionada da superfície topográfica (sem escala) do alvo Suruca

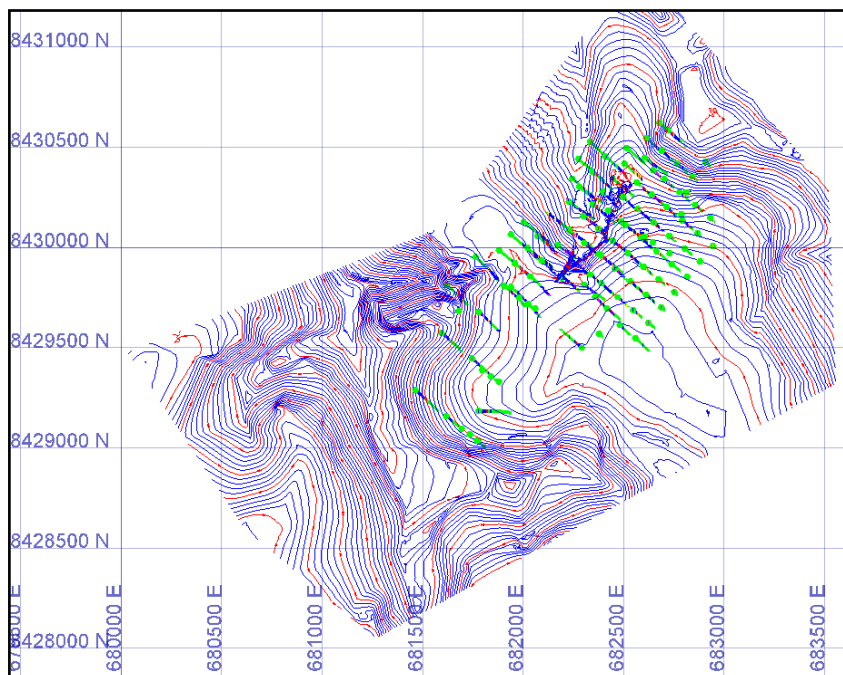


Figura 28 - Visualização em planta (sem escala) das curvas de isovalores de cota juntamente com os furos de sondagem realizados para os trabalhos de pesquisa no alvo Suruca

5.1.4 Modelagem tridimensional tradicional do corpo mineralizado e dos principais halos de alteração

A modelagem tridimensional tradicional de um sólido a três dimensões representando um corpo de minério é gerada através de um programa de computador usando um processo de triangulação, a partir de seções verticais e/ou horizontais.

Dois importantes atributos foram determinados como elementos fundamentais e selecionados como alvo para este estudo. Um dos elementos fundamentais do alvo Suruca é a definição do corpo mineralizado. Como o minério proveniente do depósito Suruca vai ser processado na planta de beneficiamento da mina Chapada, os modelos de mineralização tridimensionais da zona mineralizada, foram modelados utilizando o mesmo teor de corte para ouro que é praticado para a mina de Chapada atualmente.

A modelagem foi realizada delimitando a zona mineralizada por meio da aplicação de um teor de corte de 0.2 g/t.

A figura 29 mostra os polígonos gerados pela delimitação da zona mineralizada.

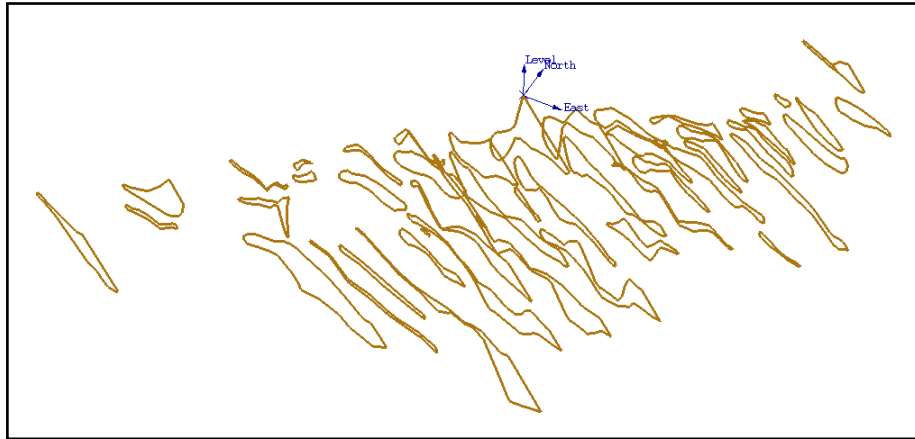


Figura 29 - Visualização rotacionada(sem escala) das seções com os polígonos delimitando a zona mineralizada com corte em 0.2 g/t

Os sólidos foram criados pelo método de união de polígonos gerados a partir de seções verticais, sendo que estes polígonos foram modelados seguindo a malha dos furos de sondagem. A direção dos polígonos foi ajustada de modo que fosse ortogonal à direção principal da mineralização e a superfície topográfica da área em questão foi utilizada como limite superior na direção altimétrica.

As figuras 30 e 31 mostram o resultado do modelo tridimensional da zona mineralizada.

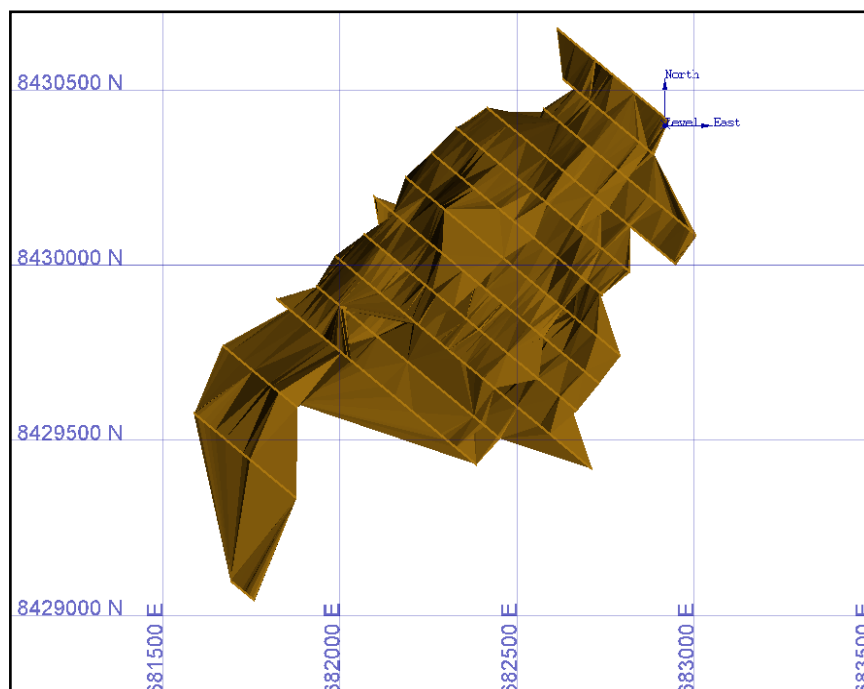


Figura 30 - Visualização em planta (sem escala) do modelo tridimensional da zona mineralizada com corte em 0.2 g/t

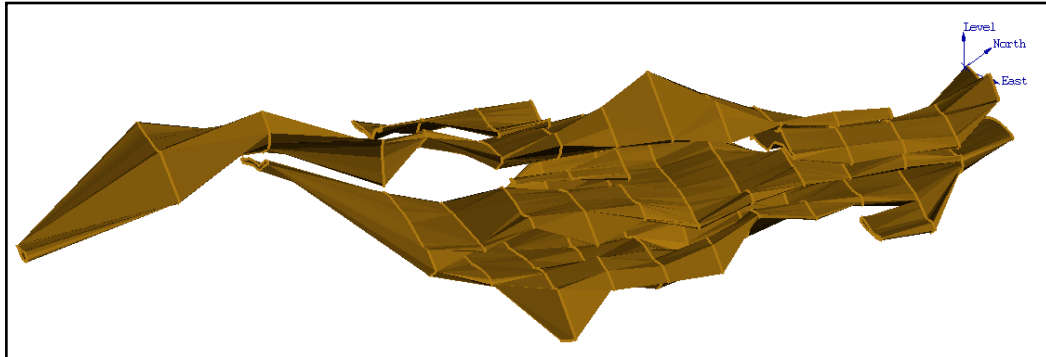


Figura 31 - Visualização rotacionada (sem escala) do modelo tridimensional da zona mineralizada com corte em 0.2 g/t

O corpo mineralizado modelado individualizou 4 corpos principais e algumas pequenas lentes próximas ou entre estes corpos. No geral, a zona mineralizada teve comprimento de cerca de 1800 metros ao longo da direção principal e cerca de 750 metros de largura ao longo do mergulho do corpo, partindo da superfície. A direção principal do corpo apresentada foi em torno de N40°E e um mergulho variando dentre 20° a 35° no sentido NW.

Como se espera que grande parte da mineralização esteja contida no Halo Sericítico e na alta proporção do Halo Propilítico, conforme citado anteriormente, decidiu-se modelar os dois principais tipos de alteração existentes no depósito pois as mesmas juntas representam pouco mais de 80% do depósito, sendo assim, o segundo elemento fundamental selecionado.

A direção preferencial selecionada para a criação das seções foi a mesma utilizada para gerar o modelo da zona mineralizada.

A Figura 32 mostra os polígonos gerados para a alteração sericítica e propilítica.

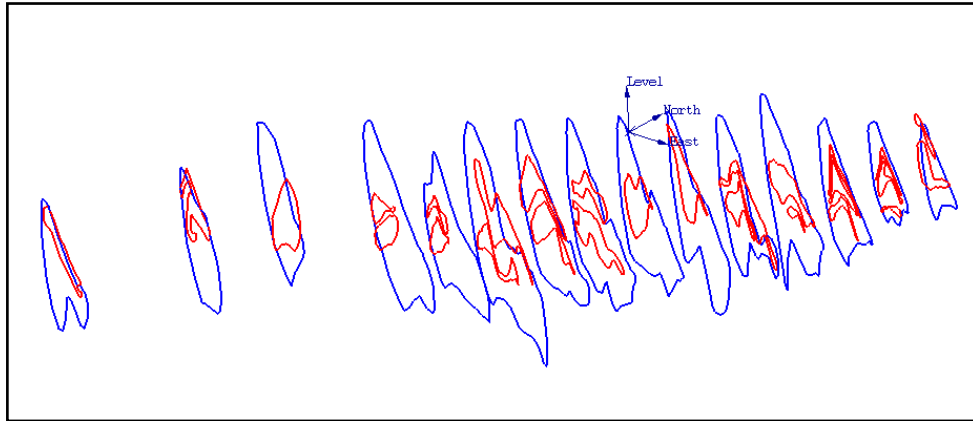


Figura 32 - Visualização rotacionada (sem escala) das seções com os polígonos das alterações sericítica (vermelha) e propilítica (azul)

Os modelos da alteração sericítica e propilítica em várias partes são coincidentes, porém para posterior criação de modelo de blocos, os dados de alteração sericítica terão prioridade sobre os de propilítica, pois pelas análises realizadas, notou-se que na maior parte do depósito, a alteração sericítica está contida dentro da alteração propilítica. As Figuras 33 a 36 apresentam os corpos tridimensionais gerados para as alterações sericíticas e propilíticas.

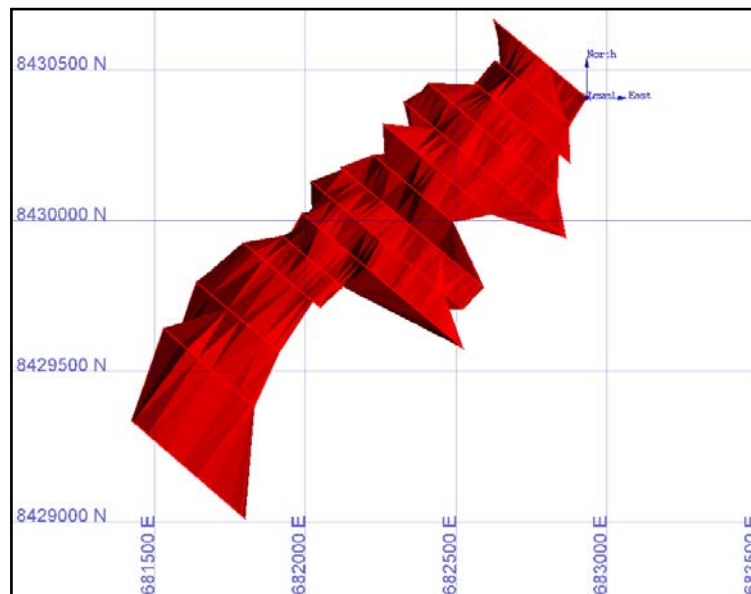


Figura 33 - Visualização em planta (sem escala) do modelo tridimensional da alteração sericítica

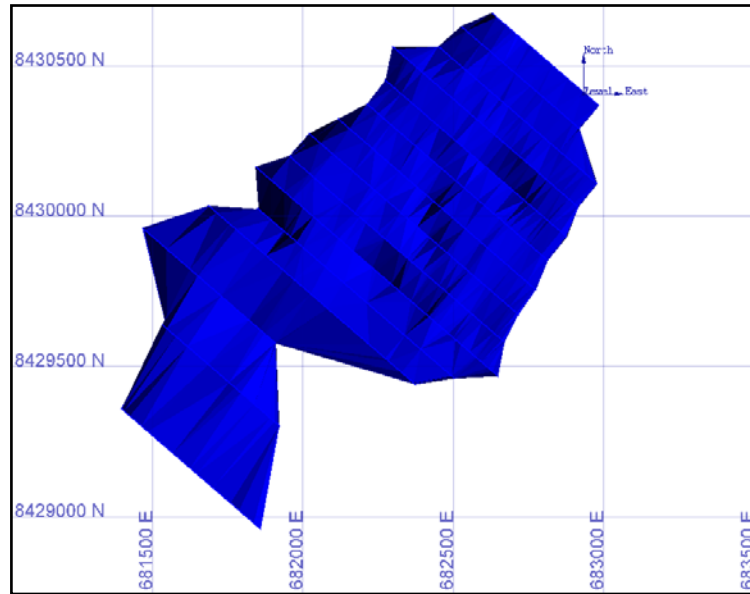


Figura 34 - Visualização em planta (sem escala) do modelo tridimensional da alteração propilítica

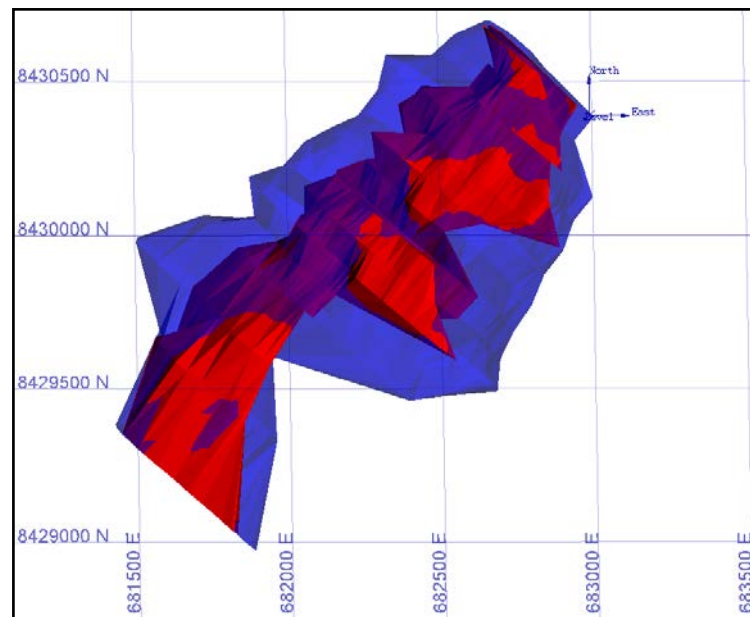


Figura 35 - Visualização em planta (sem escala) dos modelos tridimensionais da alteração sericítica (vermelho) e propilítica (azul)

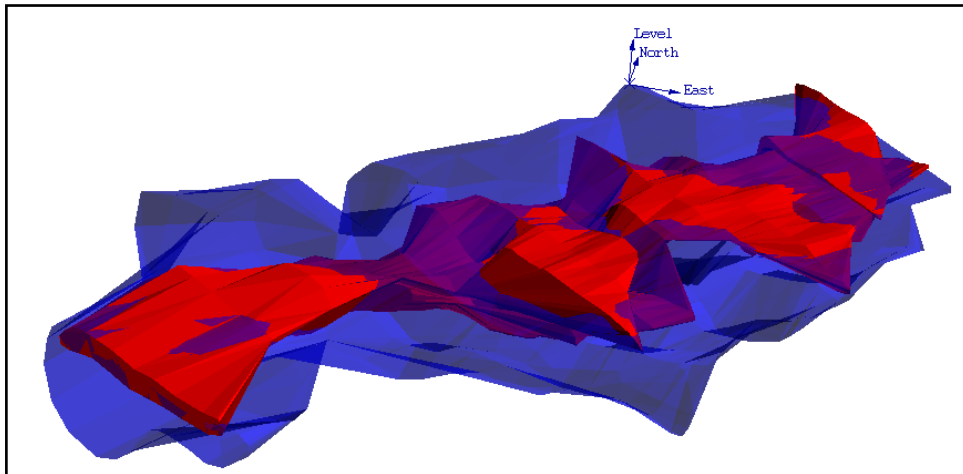


Figura 36 - Visualização rotacionada (sem escala) dos modelos tridimensionais da alteração sericítica (vermelho) e propilítica (azul)

Tanto o sólido gerado para a alteração sericítica quanto o sólido gerado para a alteração propilítica tiveram comprimento de cerca de 1800 metros em direção em relação a direção N40°W e ambos os mergulhos variaram bastante mas pode-se considerar em média por volta de 30° no sentido NE.

5.1.5 Regularização das amostras ou composição

O termo compositar (regularizar as amostras) refere-se ao procedimento de combinar valores adjacentes ao longo dos intervalos do furo de sondagem. O teor de cada novo intervalo é calculado com base na média ponderada dos valores originais das amostras, contidas em cada fração do intervalo. A regularização das amostras é normalmente necessária para as amostras terem o mesmo suporte e mesma representatividade durante as estimativas em que estas amostras são utilizadas, sempre respeitando a diferenciação geológica existente entre as amostras.

Existem várias técnicas e fórmulas de se compositar que são mais adequadas de acordo com seus fins específicos. O software Vulcan disponibiliza uma série de opções para se gerarem compósitos.

Para o trabalho foi utilizado o método chamado “Run Length” que é a forma que corresponde à composição de comprimento constante. Neste caso os dados são regularizados a um mesmo comprimento a partir da boca do furo, exceto ao final, no

fim da sondagem e nas bordas geológicas ou de triangulações. Pode-se também pedir para quebrar os intervalos das compósitas quando se varia ou o tipo de rocha, tipo litológico, tipo de oxidação, etc.

O tamanho determinado para a regularização foi de 1 metro, porém permitindo a interrupção e início de um novo intervalo quando há mudança do tipo de alteração. A determinação de regularização ao comprimento de 1 foi de acordo com a média dos intervalos de amostragem das sondagens.

As figuras 37 e 38 mostram os histogramas de intervalos antes e após a composição.

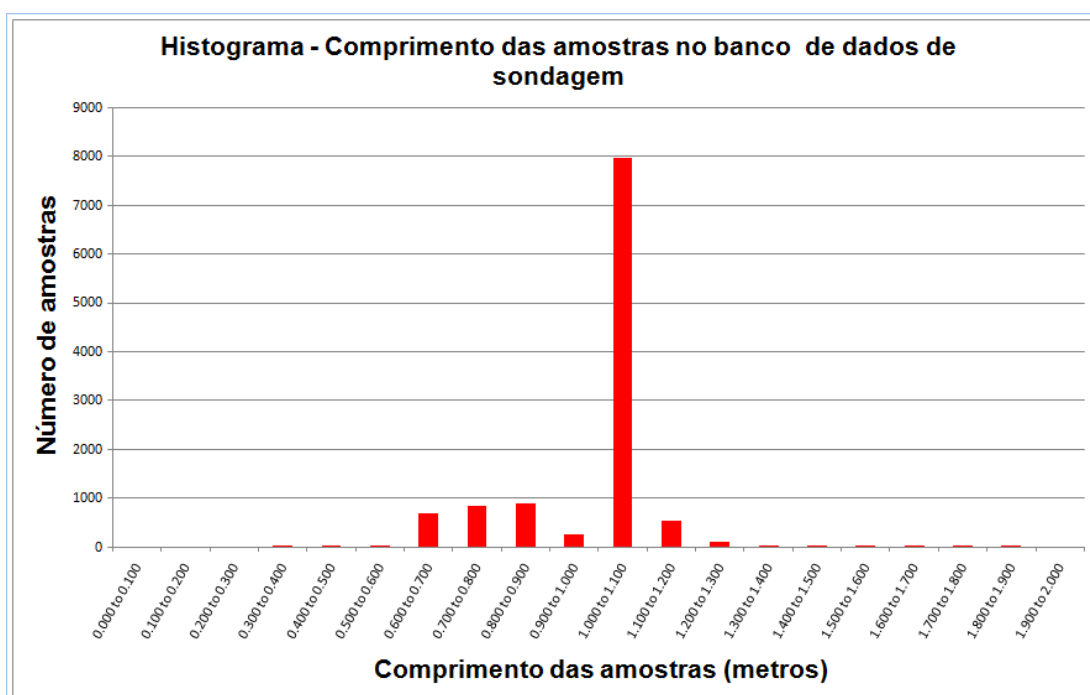


Figura 37 - Comprimento das amostras do banco de dados de sondagem

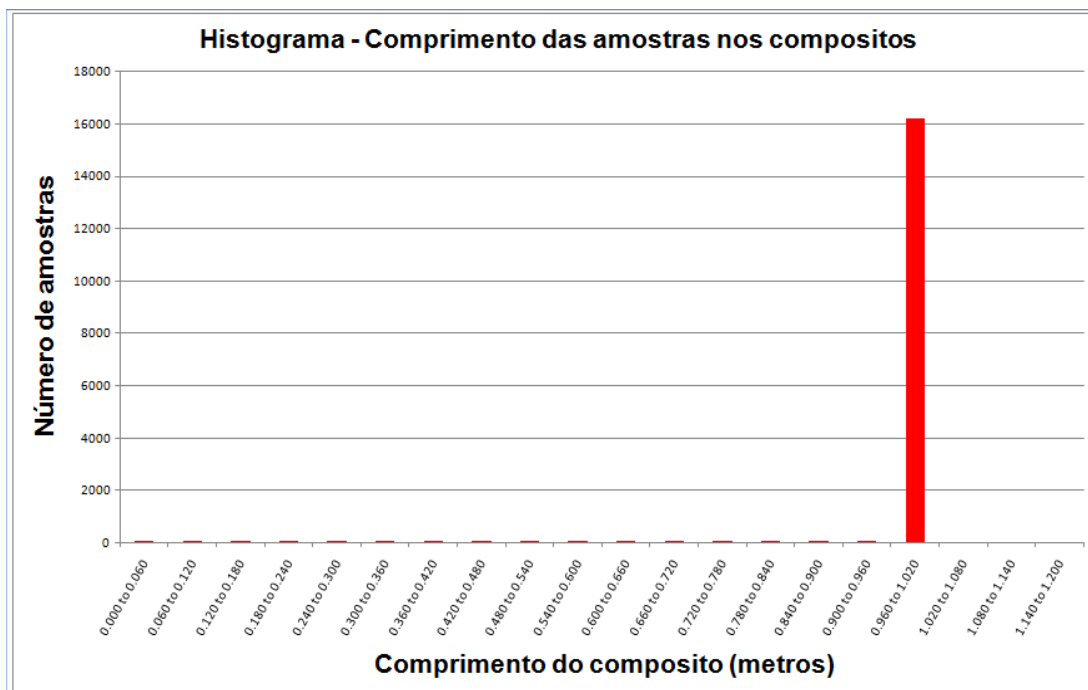


Figura 38 - Comprimento das amostras no banco de dados de compósitos

Estes histogramas mostram que após a composição a grande maioria dos intervalos de amostras gerados ficou com tamanho de 1 metro, conforme definido. Nota-se também que após a composição, nenhum dos intervalos ficou superior a 1 metro e as amostras que ficaram com intervalo inferior a um metro foram as que estão no contato separador entre dois tipos de alteração diferentes.

A figura 39 mostra o painel da opção de geração de compósitas onde se especifica o comprimento pela qual se deseja gerar as amostras pelo método Run length.

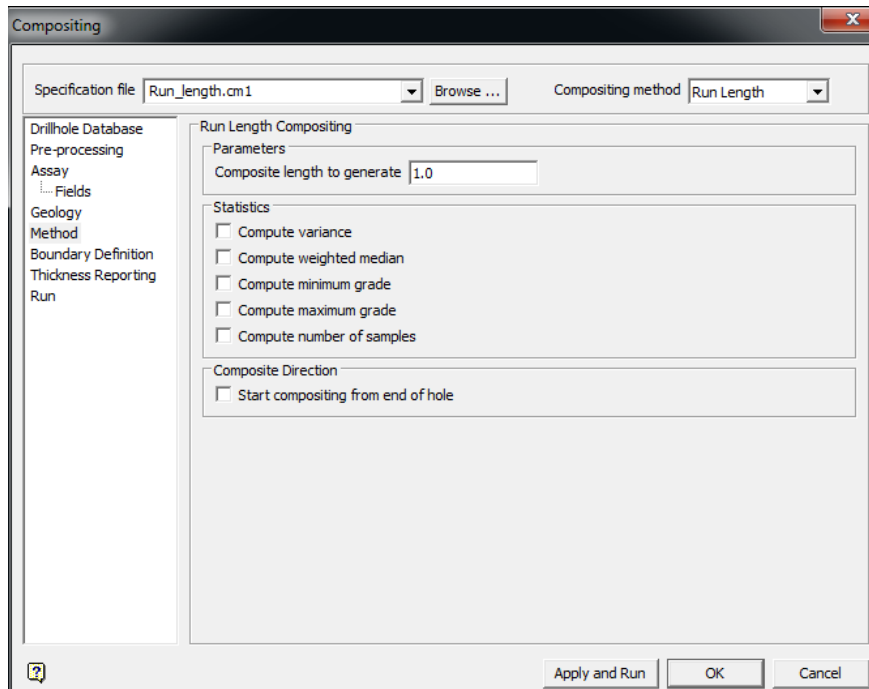


Figura 39 - Painel do Vulcan mostrando a determinação do comprimento de 1 metro para geração de compósitos pelo método “Run Length”

5.1.6 Variografia

Os variogramas experimentais foram obtidos a partir dos dados de compósitas e utilizando uma série de parâmetros como as direções principais de anisotropia, a distância h denominada de passo (lag), números de passos e também a definição de uma janela de pesquisa definida por um ângulo de tolerância e a própria tolerância destas diversas distâncias.

Foram realizados variogramas experimentais para diferentes direções e após a análise de anisotropia foram definidas três direções preferenciais de variabilidade. A direção principal foi N45°E em um plano horizontal que é a direção de tendência da mineralização. A direção secundária foi de S65°E também num plano horizontal e a terceira direção foi à vertical, perpendicular às outras duas direções. Os outros parâmetros utilizados se encontram na tabela 8:

Tabela 8: Parâmetros utilizados para geração dos variogramas

Direções	Azimute	Tamanho Passo (m)	Número de Passos	Tolerância do passo (m)	Ângulo de tolerância do cone	Tolerância do Azimute	Tolerância da distância horizontal (m)	Tolerância da distância vertical (m)
Maior	45	65	15	32.5	90	10	30	10
Semi	135	40	8	20	90	10	30	10
Menor	45	1	15	0.5	90	10	10	5

Os tamanhos dos passos, a princípio foram definidos em função da malha de amostragem e foram ajustados até encontrar variogramas satisfatórios para a utilização na estimativa. A figura 40 apresenta um desenho esquemático apresentando a representação dos parâmetros utilizados para o cálculo do variograma.

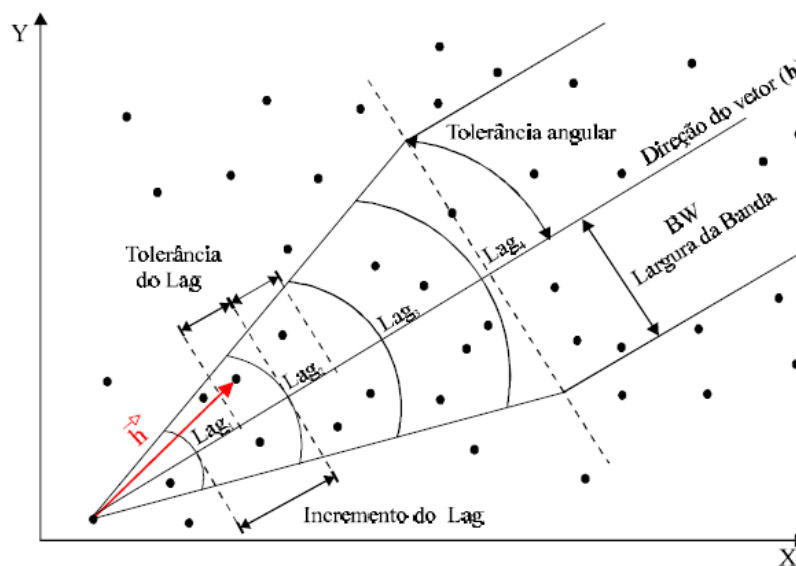


Figura 40: Figura esquemática representando os parâmetros utilizados para o cálculo do variograma (Modificado de Deutsch e Journel, 1992)

No Vulcan não é necessário realizar a codificação dos atributos entre 0 e 1 para a variografia assim como para a posterior krigagem de indicatrizes. Uma vez definidas quais são as categorias, o software automaticamente realiza a codificação e faz o processo de variografia. A figura 41 mostra o painel de variografia do Vulcan no qual se define quais são as categorias (no caso 1 para sericítica e 3 para propilítica) para a geração dos semivariogramas para indicadores categóricos. A figura 42 mostra o painel de variografia do Vulcan no qual se define quais os cortes a serem utilizados (no caso corte de 0.2 g/t) para a geração dos semivariogramas para indicadores contínuos.

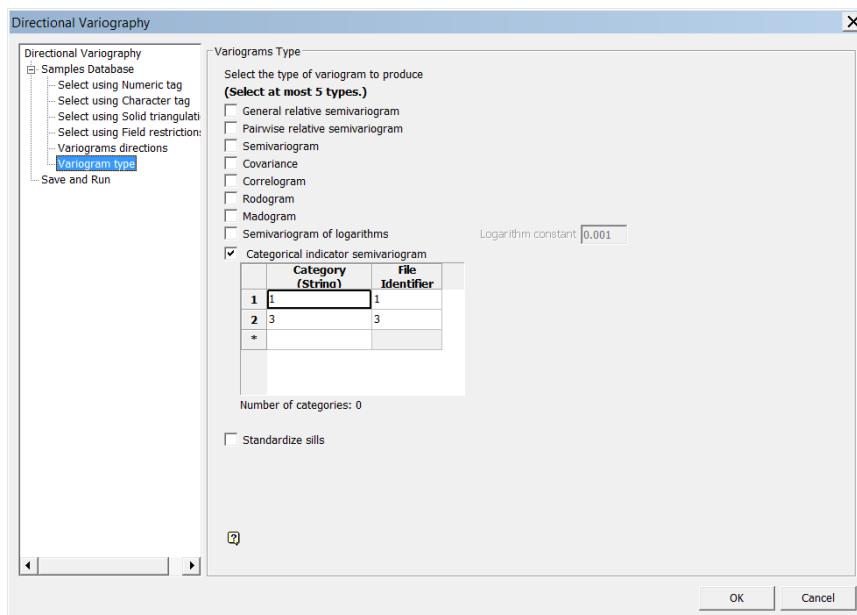


Figura 41 - Definição das categorias para a geração dos semivariogramas indicadores categóricos

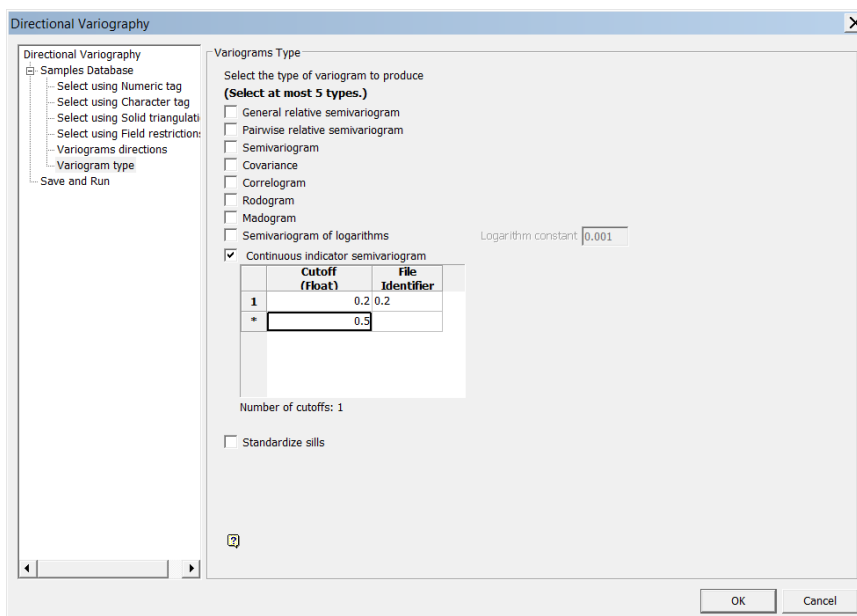


Figura 42 - Definição dos cortes para a geração dos semivariogramas indicadores contínuos

Modelos variográficos esféricos foram ajustados para essas variáveis, pois são os modelos que mais se adequam ao variograma experimental encontrado.

As Figuras de 43 a 51 mostram os variogramas experimentais e modelados (ajustados) para as três direções para as variáveis de corte de ouro em 0.2 g/t e para as variáveis categóricas para alteração sericítica e para a propilítica, respectivamente.

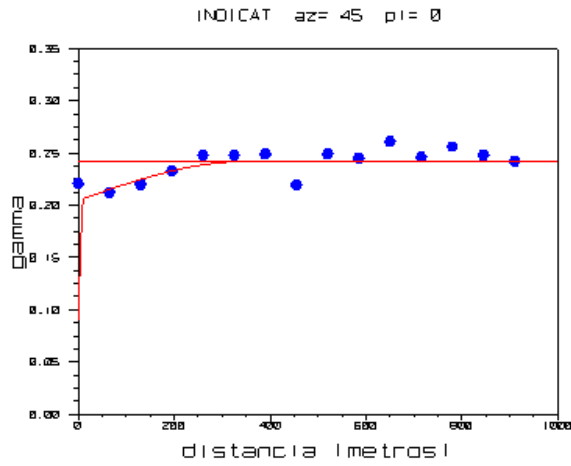


Figura 43 - Variograma para a direção de maior variabilidade da variável indicatriz de corte de 0.2 g/t de ouro

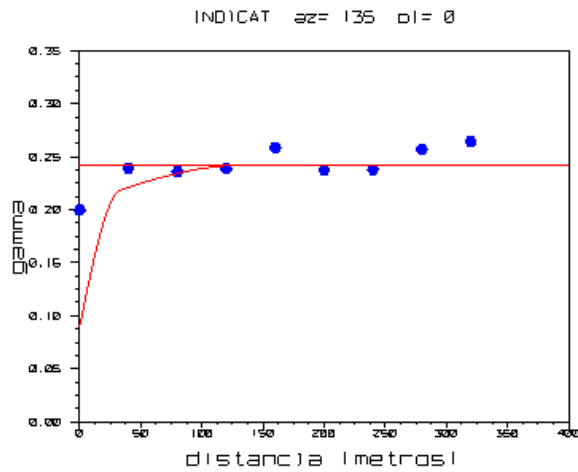


Figura 44 - Variograma para a direção de média variabilidade da variável indicatriz de corte de 0.2 g/t de ouro

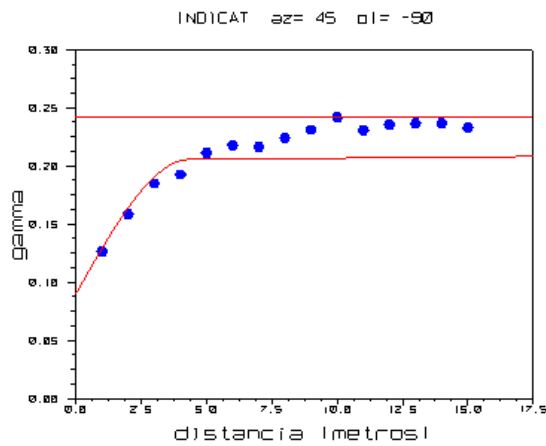


Figura 45 - Variograma para a direção de menor variabilidade da variável indicatriz de corte de 0.2 g/t de ouro

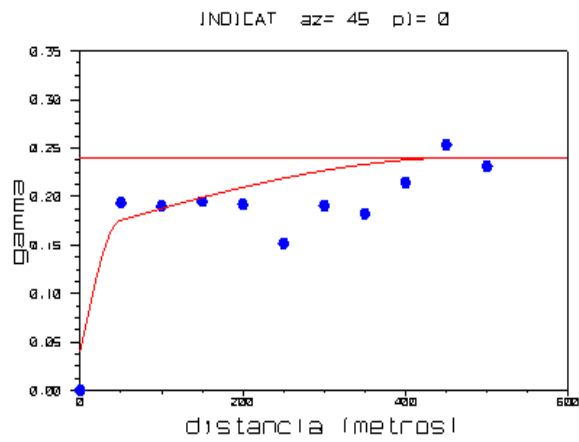


Figura 46 - Variograma para a direção de maior variabilidade da variável indicatriz de alteração sericítica

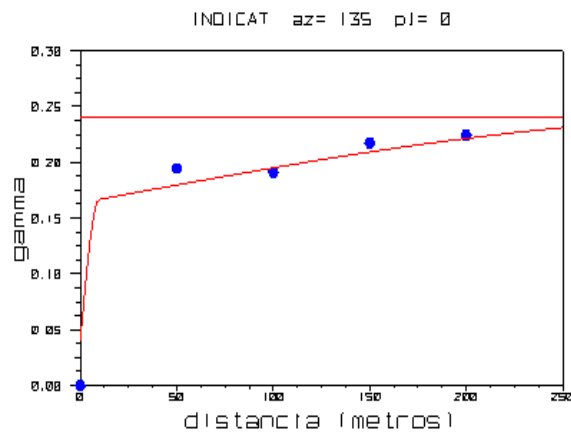


Figura 47 - Variograma para a direção de média variabilidade da variável indicatriz de alteração sericítica

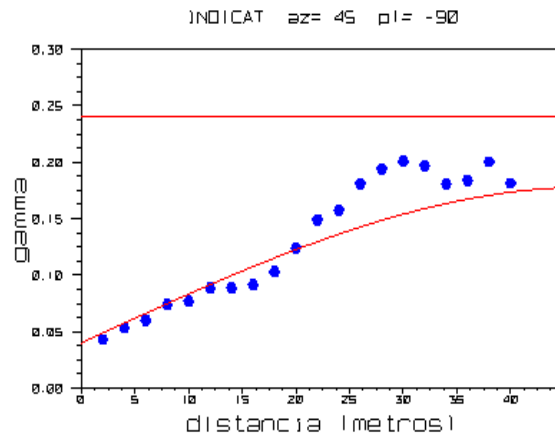


Figura 48 - Variograma para a direção de menor variabilidade da variável indicatriz de alteração sericítica

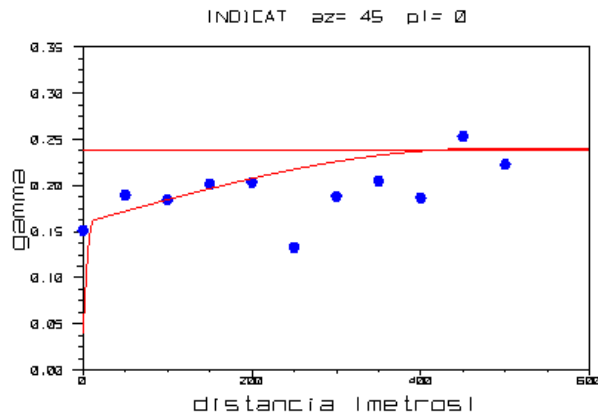


Figura 49 - Variograma para a direção de maior variabilidade da variável indicatriz de alteração propilítica

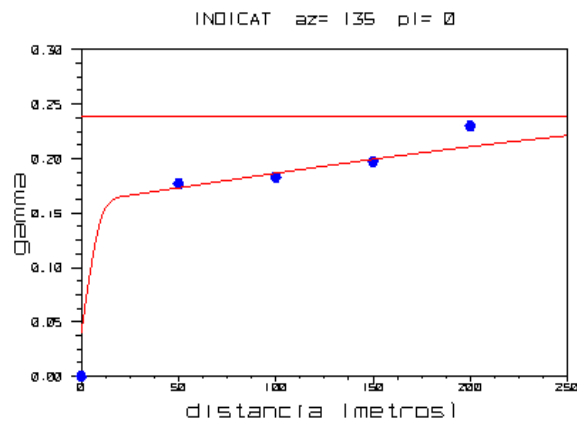


Figura 50 - Variograma para a direção de média variabilidade da variável indicatriz de alteração propilítica

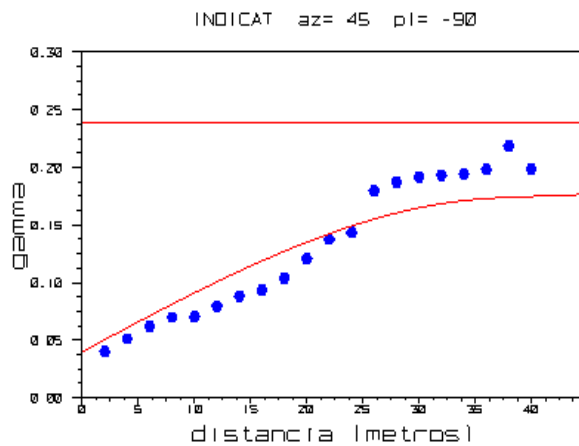


Figura 51 - Variograma para a direção de menor variabilidade da variável indicatriz de alteração propilítica

A tabela 09 apresenta os parâmetros dos modelos dos variogramas que foram em seguida utilizados para a estimativa da krigagem de indicatrizes.

Tabela 9: Resultado dos modelos de variogramas

Corte 0.2 g/t de Au			Efeito Pepita 0.09		
Parâmetros	Modelo	C1	Maior (m)	Semi (m)	Menor (m)
Estrutura 1	Esférico	0.115	272	37.9	4.03
Estrutura 2	Esférico	0.037	375.1	325	127.9

Propilítica			Efeito Pepita 0.04		
Parâmetros	Modelo	C1	Maior (m)	Semi (m)	Menor (m)
Estrutura 1	Esférico	0.04	35	21.8	8.29
Estrutura 2	Esférico	0.079	79	21.2	9.59
Estrutura 3	Esférico	0.081	497	444	303

Sericitica			Efeito Pepita 0.04		
Parâmetros	Modelo	C1	Maior (m)	Semi (m)	Menor (m)
Estrutura 1	Esférico	0.124	308	37	9.68
Estrutura 2	Esférico	0.076	479	472	301

Os variogramas para o a variável indicatriz com corte em 0.2g/t de Au, foram modelados fornecendo duas estruturas esféricas, com um efeito pepita de 0.09.

Os variogramas para a variável indicatriz categórica para a alteração propilítica, depois de modelado forneceram três estruturas esféricas e um efeito pepita de 0.04. Já para a alteração sericítica forneceu duas estruturas esféricas e também com efeito pepita de 0.04.

5.1.7 Modelo de blocos

O modelo de blocos criado para o depósito Suruca foi determinado de forma a englobar todos os dados de sondagens utilizados seguindo, também, a orientação preferencial dos mesmos. O modelo de blocos possui uma atitude (bearing) de 40° rotacionado o eixo X em torno do eixo Z, de acordo com a regra da mão esquerda, em relação a origem. A origem é um ponto arbitrário utilizado para definir o início do modelo e o eixo da rotação. O ponto de origem, tamanho do modelo nas direções norte, leste e elevação, assim como os tamanhos dos blocos em todas as direções, se encontram na tabela 10:

Tabela 10: Informações de orientação do modelo de blocos para Suruca

	X (metros)	Y (metros)	Z (metros)
Origem (UTM)	682200	8428200	-100
tamanho do modelo	2750	1750	600
tamanho dos blocos	10	10	5

O tamanho dos blocos foi determinado em função de se ter um suporte suficiente para que seja utilizado em processos de planos de lavra de um depósito de ouro como o de Suruca.

O modelo de blocos foi criado com uma série de variáveis de forma que as mesmas possam armazenar toda informação necessária para o estudo em questão. O objetivo de se criar o modelo de blocos foi armazenar, para posterior comparação, os resultados dos modelos tridimensionais gerados e os resultados das krigagens de indicatrizes.

5.1.8 Estimativa dos indicadores contínuos e categóricos

Foi realizada uma estimativa de indicadores para a variável contínua de ouro com corte de 0.2 g/t e duas estimativas para indicadores categóricos sendo uma para alteração propilítica e outro para alteração sericítica, utilizando os dados variográficos apresentados anteriormente. Para a estimativa foi utilizada o método da krigagem ordinária indicadora ou krigagem ordinária de indicatrizes.

Para determinar quais amostras seriam utilizadas na estimativa de um bloco foi utilizado:

- um elipsóide de busca de 220 metros no sentido do eixo maior, 100 metros para o eixo semi-maior e 25 metros no eixo menor;
- atitude (bearing) de 40° e mergulho da camada de 20° (dip) seguindo a direção do corpo;
- no mínimo uma amostra e máximo de 5 amostras para estimar um bloco.

Como o banco de dados contém mais tipos de alteração além da propilítica e da sericítica, para definição no modelo de blocos, foi adotado que quando a probabilidade do tipo de alteração de um bloco ser do tipo sericítica for maior que a de ser propilítica, o bloco seria classificado como zona sericítica; e quando a probabilidade do tipo de alteração de um bloco de ser do tipo propilítica for maior que a de ser sericítica, o bloco seria classificado como zona propilítica. Quando a probabilidade for menor que 30% para qualquer um dos dois tipos de alteração anterior, o bloco seria classificado como “outra zona”, a fim de melhor representar as regiões onde contém as outras alterações que não foram estudadas.

Para facilitar o processo de visualização e comparação dos resultados, apresentam-se seções verticais (Figuras 53 a 56) das variáveis do modelo de blocos estimadas, das variáveis que contém as informações dos modelos tridimensionais, juntamente com os furos de sondagens utilizados como base para a geração de ambos. A figura 52 mostra a localização da seção vertical realizada para ilustrar os resultados da zona mineralizada e dos tipos de alteração.

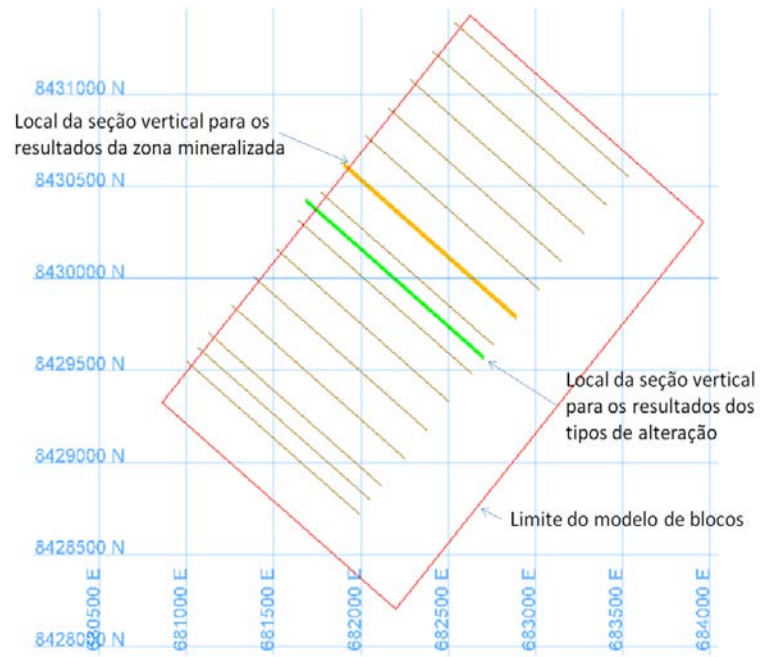


Figura 52 - Localização das seções verticais realizadas no modelo de blocos

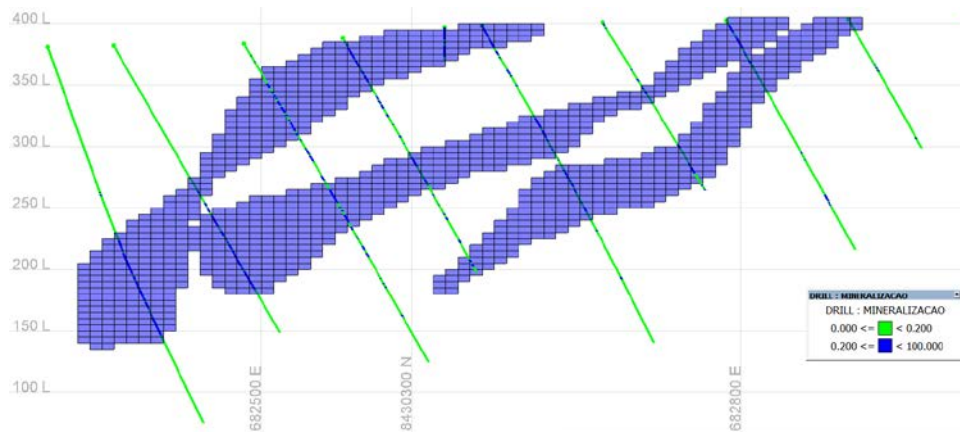


Figura 53 - Furos de sondagem e modelo de blocos visualizando a variável gerada a partir do modelo tridimensional para a zona mineralizada com corte em 0.2 g/t de ouro (sem escala)

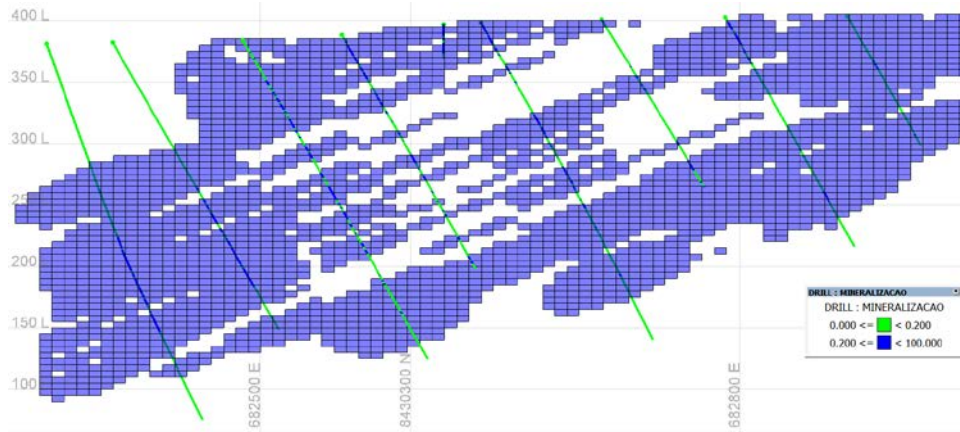


Figura 54 - Furos de sondagem e modelo de blocos visualizando a variável estimada para a zona mineralizada com corte em 0.2 g/t de ouro (sem escala)

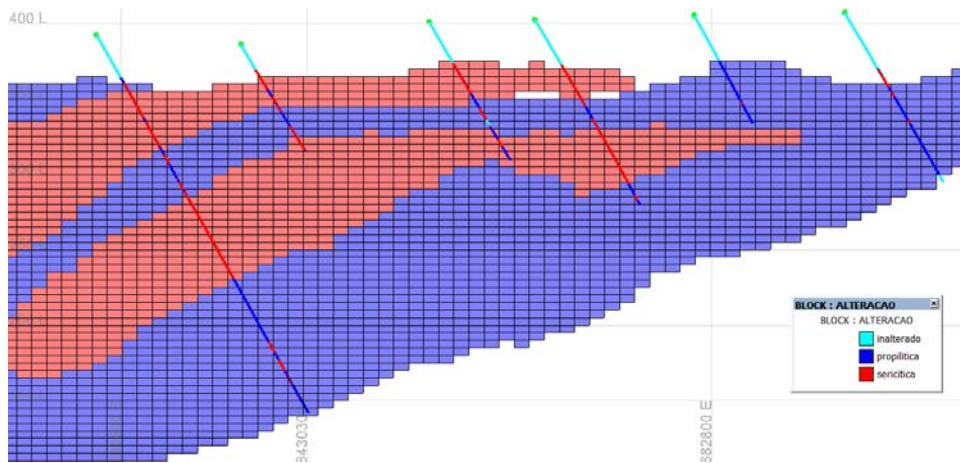


Figura 55 - Visualização do modelo de blocos pela variável gerada a partir do modelo tridimensional para os tipos de alteração sericítica e propilítica (sem escala)

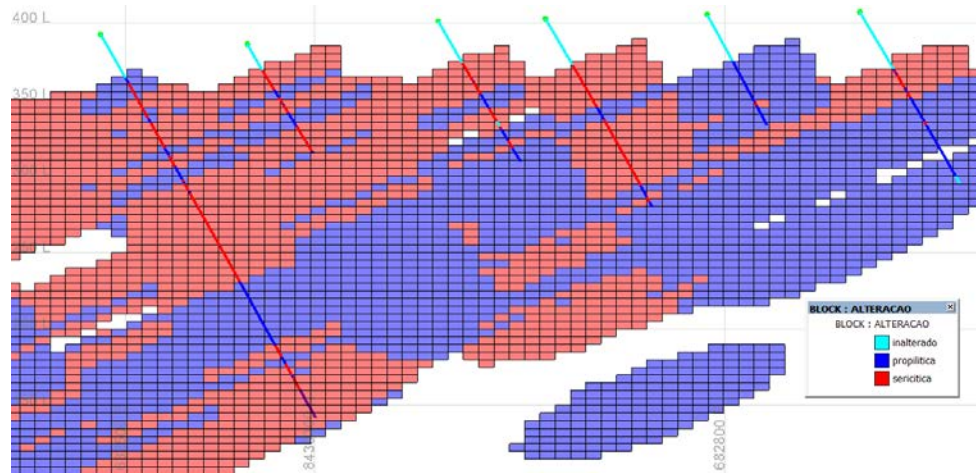


Figura 56 - Visualização do modelo de blocos pela variável estimada pela krigagem de indicatrizes para a variável categórica tipo de alteração - sericítica e propilítica (sem escala)

Com as imagens das figuras 55 e 56, pode-se observar algo que acontece em algumas regiões dentro da malha de sondagem, onde furos mais longos são realizados nas bordas da malha de sondagem deixando a região entre estes extremos com informações mais imprecisas, o que no modelamento tridimensional depende diretamente da interpretação de quem se esta modelando e na estimativa, pode ocorrer erros por não se ter informações suficientes.

CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES

Antes de se fazer qualquer estudo em um empreendimento mineiro, é importante fazer a validação do banco de dados a ser utilizado de forma a minimizar os erros e não utilizar dados irreais.

Os estudos estatísticos permitiram perceber que a oxidação sericítica e a propilítica são os dois tipos de alteração mais importante para o depósito Suruca, pois além de ser a maioria no depósito, também incorporam a maior parte da mineralização.

A modelagem tridimensional é um dos principais processos hoje utilizados na avaliação de jazidas minerais, sendo utilizado para cálculo de volumes de recursos e reservas em empreendimentos mineiros e pode ser utilizado perfeitamente para o estudo feito com resultados satisfatórios, sendo que, para o depósito de Suruca, mostra um pouco de dificuldade em ser modelada e gerada em regiões onde ocorre grande variação dos tipos de variáveis que estão sendo modeladas, diluindo algumas informações e suavizando um pouco os resultados. Uma boa modelagem necessita de muito tempo e envolve um grau maior de dificuldade. O resultado do modelo tridimensional depende diretamente, também, do conhecimento do depósito e da interpretação da pessoa executa a modelagem.

A modelagem dos tipos de alteração e da zona mineralizada com corte de ouro a 0.2 g/t permitiu a individualização de corpos de minérios e a observação da influência da alteração, trazendo informações aplicáveis aos modelos de planos de lavra e também às fases de avaliação deste tipo de mineral no depósito estudado, permitindo também uma melhor compreensão da situação mineralógica da mineralização e entendendo melhor a distribuição dos tipos de alteração em Suruca.

Os variogramas de variáveis indicatrizes foram suficientes para compreender a variabilidade das variáveis mais importantes e com resultados apropriados para utilização na krigagem de indicatrizes.

A krigagem de indicatrizes apresenta uma alternativa bastante interessante em estudos de avaliação de depósitos. Uma vez encontrado parâmetros adequados para a estimativa,

torna-se um método muito rápido de se fazer e ser atualizado quando chegam novas informações adicionais.

Na estimativa de variável contínua, é importante fazer a estimativa utilizando uma série de valores de cortes para melhor avaliação, tornando mais fácil e rápido um novo estudo, caso haja alguma modificação no teor de corte aplicado para o depósito.

Neste trabalho, o resultado da krigagem para o corte de 0.2 g/t apresentou-se muito satisfatório, mostrando que a técnica pode ser aplicada como uma alternativa em relação a modelagem tridimensional tradicional. A maior diferença entre o resultado das duas técnicas, é que a modelagem tridimensional há uma maior continuidade do corpo, devido a interpretação do profissional que executa a modelagem, o que nem sempre ocorre com a krigagem de indicatrizes.

Os resultados obtidos pela KI para os tipos de alteração também apresentaram resultados satisfatórios, principalmente para uso durante a fase de estudo de viabilidade do empreendimento, mas em outras fases como por exemplo durante a operação da mina, não substituem totalmente os modelos tridimensionais tradicionais, mas podem ser utilizados conjuntamente.

A KI também se mostrou de grande utilidade em situações como no caso estudado, onde foi possível separar as regiões onde predominam as alterações propilítica e sericítica e possuem outros tipos de alteração que se encontram próximas ou em pequenas partes dentro das mesmas. Isso já nem sempre é possível dentro da modelagem tridimensional se o modelo não for gerado para todos os tipos de alteração.

É importante se realizar um maior detalhamento dos furos de sondagem de forma a que todos os furos interceptem as regiões de maior teor de ouro como forma de melhorar o resultado do modelo e se obter resultados mais precisos e confiáveis. Um adensamento na malha de sondagem também seria importante de forma a melhorar a estimativa e facilitar a interpretação durante o modelamento tridimensional.

Ambos os modelos de blocos gerados foram considerados aplicáveis para as posteriores fases de estimativa de teores.

Notou-se também que o resultado da krigagem de indicatrizes pode ser utilizado como um auxílio para uma posterior modelagem tridimensional, ajudando na análise de algumas regiões com pouca informação. Desta forma pode-se concluir que a krigagem de indicatrizes aliada a um modelo tridimensional e com conhecimento geológico da área, podem levar a resultados com menos incerteza quando utilizado apenas um dos métodos de determinação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, F.F.M.; HASUI, Y.; NEVES, B.B.B.; FUCK, R. R (1977). Províncias estruturais brasileiras. Anais do VIII SIMP. GEOL. NORD, SBG, Campina Grande, p.363-391.
- ARANTES, D.; OSBORNE, G.A.; BUCK, P.S.; PORTO, C.G. (1991). The Mara Rosa volcanosedimentary sequence and associated gold mineralization. In: BRAZIL GOLD '91, Belo Horizonte: E.A. Ladeira (ed), Balkema, Rotterdam, p. 221-229.
- BROWN, G. [et al] (1997). Os recursos físicos da terra (S238) – Bloco 3 Parte 1 – Depósitos minerais1: Origem e distribuição. Tradução e adaptação: Roberto Perez Xavier. Campinas, SP: Editora da UNICAMP. 121p.
- CINTRA, E.C. (2003). Aplicação de redes neurais no controle de teores de cobre e ouro no depósito de Chapada (GO) / Evandro Cardoso Cintra - Rio Claro, 170 f. Tese (doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas.
- DEUTSCH, C. V. (2002). Geostatistical Reservoir Modeling. Oxford University Press, Alberta. 376p.
- DEUTSCH, C. V.; JOURNAL, A.G. (1992). GSLIB: Geostatistical Software Library and user's guide. New York, Oxford University Press, 1992. 339p.
- FERREIRA, M. (2006). Modelagem Tridimensional de Depósitos Minerais. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós Graduação em Engenharia Mineral – UFOP, Ouro Preto. 94p.
- FUCK, R. A.; DANTAS, E. L.; DE SORDI, D. A.; CHIARINI, M. F. N.; OLIVEIRA, C. G.; ALMEIDA T. ALVARENGA, C. J. S. (2006). Relatório Final da Folha SD.22-Z-A-III - Santa Terezinha de Goiás. Programa Geologia do Brasil (PGB/LGB), Carta Geológica – Escala 1:100.000. Brasília-DF. CPRM- Serviço Geológico do Brasil.
- ISAAKS, E.H. & SRIVASTRAVA, R.M. (1989). An Introduction to Applied Geostatistics. New York, Oxford University Press, 1989, 651p.

- JOURNAL, A.G. & HUIJBREGTS, C.J. (1978). Mining Geoestatistics. London, Academic Press, 600p.
- JOURNAL, A.G. (1983). Non-parametrics estimation of spatial distribution. *Mathematical Geology*, 15(2): 445-468.
- JUNGES S.L., PIMENTEL M.M., DANTAS E.L., LAUX J.H. (2003). New IDS-TIMS U-Pb ages in the western portion of the Mara Rosa Arc: two hundred million years of arc building. In 4 South American Symposium on Isotope Geology, Salvador, 2003. Short Papers. Salvador, CBPM, IRD, v.1:198-201.
- JUNGES S.L., Pimentel M.M., Dantas E.L., Laux J.H. (2002). Idades U-Pb de granites sin- a tardi-tectônicos do Arco de Mara Rosa, Goiás. In 41 Congresso Brasileiro de Geologia, João Pessoa. Anais. João Pessoa, SBG, p.312.
- KUYUMIJIAN R.M., Oliveira C.G., Campos J.E.G., Queiroz C.L. (2004). Geologia limite entre os terrenos arqueanos e o Arco Magmático de Goiás na região de Chapada-Campinorte, Goiás. *Revista Brasileira de Geociências*, 34(3):329-334.
- MATHERON, G. (1965). Les Variables Régionalisées et leur Estimation. Paris, Masson. 212p.
- LANDIM, P.M.B. & STURARO, J.R. (2002). Krigagem indicativa aplicada à elaboração de mapas probabilísticos de riscos. DGA, IGCE, UNESP/Rio Claro, Lab. Geomatématica, Texto Didático 06, 19 pp. Disponível em <<http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/textodi.html>>. Acesso em: 10/07/2011.
- OLIVEIRA C.G., QUEIROZ, C.L., PIMENTEL M.M. (2000). The Arenópolis-Mara Rosa goldcopper belt, Neoproterozoic Goiás Magmatic Arc. *Revista Brasileira de Geociências* 30(2):219-221.
- DE OLIVEIRA M.L. (2009) Economia Mineral do Brasil. Brasil, Departamento Nacional de Produção Mineral - DNPM. 764p. – Ilustradas. p. 304 – 361.
- OLIVEIRA C.G., PIMENTEL M.M., MELO L.V., FUCK R.A. (2004). The Cooper-gold and gold deposits of the Neoproterozoic Mara Rosa magmatic arc, central Brazil. *Ore Geology Reviews*, 25: 285-299.

- OLIVEIRA F.B. (2009). Características Epigenéticas do depósito de Cu-Au Chapada, Arco Magnético de Goiás. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília. Instituto de Geociências. 113f.
- OLIVEIRA, S. B. (2008). Estudos geoestatísticos aplicados a um depósito magmático de Ni-Cu. 93 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- PALERMO N. (1996). *Identificação de três séries magmáticas na região de Mara Rosa, Goiás*. In: Cong. Bras. Geol., 39, Salvador, *Anais*, 5:219-222.
- PALERMO N. (1996). *Le Gisement aurifère précambrien de Posee (Goiás, Brésil) dans son cadre géologique*. These de doctorat, ENSPM, Paris, 175 p + anexes.
- PALERMO N., PORTO C.G., COSTA JUNIOR. C.N. (2000). The Mara Rosa gold district, central Brazil. *Revista Brasileira Geociências*, 30(2):256-260.
- PIMENTEL M.M, FUCK R.A., DEL'REY-SILVA L.J.H (1996). Dados Rb-Sr e Sm-Nd da região de Jussara-Goiás-Mossâmedes (GO), e o limite entre os terrenos antigos do Maciço de Goiás e o Arco Magmático de Goiás. *Revista Brasileira de Geociências* 26, 61-70.
- PIMENTEL, M.M., WHITEHOUSE, M.J., VIANA, M.G., FUCK, R.A., MACHADO, N. (1997). The Mara Rosa Arc in the Tocantins Province : further evidence for Neoproterozoic crustal accretion in central Brazil. *Precambrian Research*, 81. p.299-310.
- PIRES A.C.B., SILVA A.T.M.C, CARVALHO T.S. (2007). Integração de dados aerogeofísicos e dados geoquímicos da área de Lagartixa, sul do Arco Magmático de Goiás. Paper. In: 10th International Congress of The Brazilian Geophysical Society. Rio de Janeiro. 2007.
- ROYLE, A.G. (1979). Why geostatistics? *Engineering & Mining Journal*, 180(5): 92-101p.
- SIDES, E.J. (1996). Geological modelling of mineral deposits for prediction in mining. *Geol Rundsh* (1997) 86: 342-353p.

- SILVA, A.M. (2001) Modelagem geológica e estocástica da porção NE da Mina de Morro do Ouro, Paracatu (MG) / Dissertação (mestrado) Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências. Campinas, SP. 82p.
- SMITH, M.L. and WILLIAMS,R.E. (1996). Examination of methods for evaluating remining a mine waste site. Part II. Indicator kriging for selective remediation. College of Mines and Earth Resource, University of Idaho, Moscow, ID 83843, USA. *Engineering Geology* 43: 23-30p.
- SOARES, A. (2006). *Geoestatística para Ciências da Terra e do Ambiente*. Instituto Superior Técnico – Editora IST Press, Lisboa- Portugal. Segunda Edição, 2006. 214p.
- VANN, J., and GUIBAL, D. (2000). Beyond ordinary kriging : An overview of non-linear estimation. In: *Mineral Resource and Ore Reserve Estimation : The AusIMM guide to good practice (Monograph 23)*: pp. 249-256. The Australasian Institute of Mining and Metallurgy: Melbourne.
- VANN, J., GUIBAL, D., and HARLEY, M., (2000). Multiple Indicator Kriging : is it suited to my deposit? In: *4th International Mining Geology Conference, Coolum, Queensland, 14-17 May, 2000*: pp. 9-17. The Australasian Institute of Mining and Metallurgy: Melbourne.
- VIANA, M. G. et.al. (1995). O arco magmático de Mara Rosa, Goiás: Geoquímica e geocronologia e suas implicações. *Revista Brasileira de Geociência*, v.25, n.2, p.111-123, 1995.
- YAMAMOTO, J.K. & ROCHA, M.M. (2001) Conceitos Básicos. In: Yamamoto, J.K. (org.). *Avaliação e Classificação de reservas minerais*. São Paulo, Edusp. p. 9-34.
- YAMAMOTO, J.K. (2001).; BETTERNCOURT, J.S. e MONTANHEIRO, T.J. (2001). *Análise estatística*. In: Yamamoto, J.K. (org.). *Avaliação e Classificação de reservas minerais*. São Paulo, Edusp. p. 49-68.

YAMAMOTO, J.K. (2001). Análise geoestatística. In: Yamamoto, J.K. (org.).
Avaliação e Classificação de reservas minerais. São Paulo, Edusp. p. 69-91.