

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

MODELAGEM GEOLÓGICA E ESTIMATIVA DE TEORES DO DEPÓSITO
AURÍFERO DE CAIAMAR, GOIÁS

João Estevão Júnior

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Monteiro da Rocha

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA

(TF- 2013/30)

SÃO PAULO
2013

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

MODELAGEM GEOLÓGICA E ESTIMATIVA DE TEORES DO DEPÓSITO
AURÍFERO DE CAIAMAR, GOIÁS

João Estevão Júnior

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Monteiro da Rocha

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA
(TF - 2013/30)

SÃO PAULO
2013

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus por todas as inúmeras coisas boas que tem proporcionado em minha vida, e uma delas é a conclusão de mais uma etapa, a entrega deste trabalho de formatura.

Agradeço a todos os meus familiares, que sempre estiveram do meu lado nos momentos que mais precisei e em especial aos meus pais, pois sem eles eu não seria nada.

Sou grato à empresa Yamana Desenvolvimento Mineral S/A e a todos os colaboradores que nela trabalham. Na mesma, colecionei amigos como Emerson Ricardo Ré, Talita Cristina, Ana Paula Chiquini, Marcelo Maфра e todos os demais.

Gostaria de agradecer ao meu orientador Marcelo Monteiro da Rocha por todo o apoio e ensinamentos. Também ao engenheiro de minas Carlos Carrasco por todo o auxílio nas horas de precisão.

Durante todo o período do curso de geologia conheci diversas pessoas, sendo elas das mais loucas às mais quietas. Deste período da minha vida levo grandes amigos da Turma 52 e de todo o instituto. Dentre todos, os que estavam mais presentes ao meu lado foram Tiago Antonelli (Bigola), Vinicius Serrano (Cabo Curto) e Renato Barros (Renatão). Além de todos os demais que fizeram parte da minha caminhada geológica como Heloisa Improta (Xupança), Julio Inhasz (Cher) e Victor Sorze (Dois).

Agradeço à famosa Equipe Crotalus de mapeamento geológico, composta por Atila Ferreira Pessoa (Faris) e Leonardo Brenguer (Traveka). As discussões geológicas realizadas foram muito boas, além de passar o meu aniversário com sede e fome subindo as serras de Lima Duarte (MG).

Sou grato a todo o corpo docente do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, pois através de seus ensinamentos nos tornamos profissionais preparados para encarar o mercado de trabalho e a vida profissional.

RESUMO

O depósito aurífero de Caiamar está localizado no *greenstone belt* de Guarinos que pertence ao Bloco Arqueano-Paleoproterozoico de Goiás. As mineralizações auríferas estão hospedadas em rochas metassedimentares siliciclásticas e químicas, respectivamente, da Formação Mata Preta e da Formação Cabaçal e diretamente relacionadas à sulfetação das rochas encaixantes.

Atividades de campo foram realizadas com a finalidade de reconhecer as relações de contato entre as rochas envolvidas no depósito, acompanhar as etapas de amostragem e validar o banco de dados existente.

O modelo geológico tridimensional do depósito consistiu na geração de seções geológicas verticais que foram interpoladas para a geração de sólidos representando cada unidade litológica da área de estudo. O depósito apresenta duas estruturas mineralizadas denominadas A1 e A2, na forma de corpos tabulares. O modelo geológico foi utilizado como base na modelagem de envoltórias de teores (*grade shell*) das estruturas mineralizadas presentes.

As etapas de análise estatística e análise geoestatística definiram a distribuição dos teores no depósito e seu comportamento espacial, respectivamente, na forma de histogramas, variogramas experimentais e modelos teóricos de variograma.

A validação cruzada permitiu aferir a qualidade dos modelos de variograma ajustados e definir os parâmetros de vizinhança utilizados na estimativa de teores. A krigagem ordinária utilizou os modelos teóricos de variograma e os parâmetros de vizinhança para estimar os modelos de blocos das estruturas mineralizadas.

O modelo de blocos foi rotacionado segundo o plano da mineralização e cortado dentro dos sólidos das estruturas A1 e A2 e, também, abaixo da superfície topográfica.

Palavras-chave: Modelo geológico tridimensional, análise estatística, análise geoestatística, krigagem ordinária, modelo de blocos.

ABSTRACT

The Caiamar gold deposit is located in the Guarinos greenstone belt belonging to the Goiás Archean-Paleoproterozoic block. The gold mineralization are hosted in metasedimentary siliciclastic and chemical rocks of the Mata Preta Formation and Cabaçal Formation, respectively, and directly related to the host rocks sulfidation.

Field activities were carried out in order to recognize the contact relationships between the rocks involved in the deposit, follow the steps of sampling and validate the existing database.

The three-dimensional geologic model of the deposit consisted in generating vertical geological sections were interpolated to generate solid representatives of each lithology. The deposit has two mineralized structures referred to as A1 and A2 in the form of tabular bodies. The geological model was used as a basis for modeling of the grade shell of mineralized structures present.

Statistical analysis and geostatistical analysis defined the distribution of the grade in the deposit and its spatial behavior, respectively, in the form of histograms, experimental variograms and theoretical variogram models.

Cross-validation allowed the assessment of the quality adjusted variogram models and define the parameters of the neighborhood used in grade estimation. The ordinary kriging used the theoretical variogram models and parameters of the neighborhood for estimating block models of the mineralized structures.

The block model was rotated under the plan of the mineralization and cut inside of solid structures A1 and A2 and also below to the ground surface.

Key-words: three-dimensional geologic model, statistical analysis, geostatistical analysis, ordinary kriging, block model.

Índice

1. INTRODUÇÃO	6
2. OBJETIVOS	7
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	8
3.1 Geologia regional e do depósito	8
3.2 Amostragem	11
3.3 Validação dos dados	11
3.4 Modelagem geológica 3D	12
3.5 Análise estatística	12
3.6 Análise geoestatística	14
3.7 Validação cruzada	16
3.8 Krigagem ordinária	16
4. MATERIAIS E MÉTODOS	18
5. DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO	19
6. RESULTADOS OBTIDOS	20
6.1 Atividades de campo	20
6.2 Validação dos dados	23
6.3 Modelo geológico 3D	24
6.4 Envoltória de teores	29
6.5 Análise estatística	31
6.6 Análise geoestatística	34
6.7 Modelo de blocos	37
6.8 Validação cruzada	39
6.9 Krigagem ordinária	41
7. Dificuldades encontradas	45
8. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	46
9. CONCLUSÕES	49
10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50

1. INTRODUÇÃO

A modelagem geológica é uma etapa essencial no processo de avaliação de depósitos minerais, uma vez que possibilita a determinação de volumes dos corpos de minério e de estéril, assim como a delimitação dos possíveis controles estruturais relacionados à gênese da mineralização.

O conhecimento geológico associado à amostragem permite o desenvolvimento de um modelo geológico tridimensional consistente, pois diminui a incerteza geológica associada à interpretação. Estes fatores fazem com que a determinação das espessuras das litologias envolvidas seja mais adequada, assim como a geometria do depósito e dos limites entre blocos de minério e estéril.

Assim, é possível realizar estudos geoestatísticos com maior confiabilidade, o que determinará teores e tonelagens dos recursos/reservas minerais com menor incerteza associada e também auxiliará nos estudos e definição da viabilidade de implantação de uma unidade mineira.

O depósito de Caiamar apresenta mineralizações auríferas hospedadas em rochas metassedimentares siliciclásticas e químicas associadas ao *greenstone belt* de Guarinos, localizado no Bloco Arqueano-Paleoproterozóico de Goiás.

As mineralizações auríferas estão diretamente ligadas à sulfetação, predominantemente de arsenopirita, em metagrauvacas da Formação Mata Preta e xistos grafitosos da Formação Cabaçal.

A complexidade estrutural do depósito leva à necessidade do estudo prévio do comportamento das mineralizações dentro de cada unidade. Esta complexidade é decisiva em tomadas de decisão como a compartimentação do depósito ou na explicação dos resultados obtidos pela análise geoestatística ou mesmo para as estimativas.

2. OBJETIVOS

O presente trabalho de formatura tem como objetivo realizar a modelagem geológica e estimativa de teores das unidades litológicas presentes no depósito aurífero de Caiamar.

Para atingir este objetivo foram realizadas duas atividades de campo visando à familiarização com as litologias presentes na região do depósito e com a complexidade estrutural, principalmente com as estruturas que estão relacionadas às mineralizações de ouro. Estas atividades também permitiram conhecer os processos de amostragem e como foi realizada a alimentação do banco de dados.

Ainda destaca-se como objetivo secundário, necessário para atingir o objetivo principal, a validação do banco de dados onde se buscou eliminar possíveis erros decorrentes das etapas de amostragem e de montagem do banco de dados a partir principalmente das informações dos furos de sondagem.

Outro objetivo secundário foi a interpretação dos furos de sonda para compor seções verticais e gerar os sólidos que definiram o modelo geológico tridimensional.

Visando a estimativa de teores foi realizada a análise estatística e análise geoestatística dos dados. A estimativa de teores foi realizada através de krigagem ordinária e seu principal objetivo foi determinar os teores médios de cada estrutura mineralizada, como também a sua tonelagem.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Geologia regional e do depósito

A área de estudo está localizada no noroeste do estado de Goiás, próximo à cidade de Crixás (Figura 01).

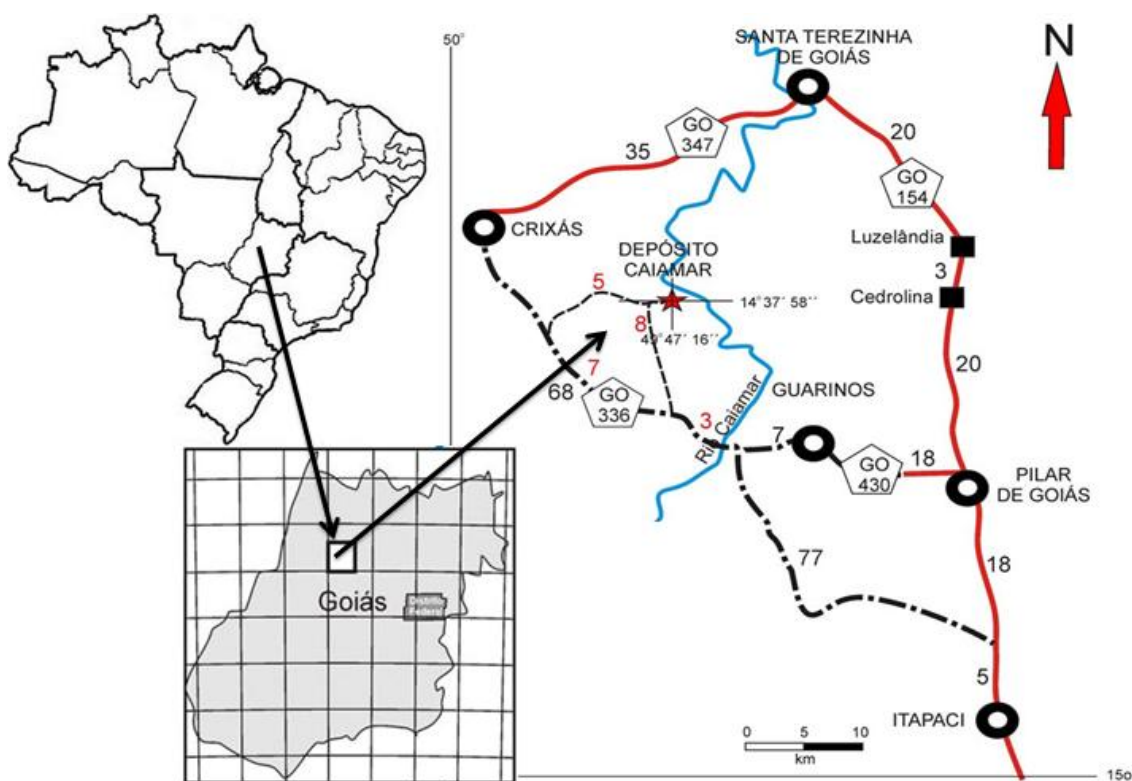


Figura 01 – Localização do depósito aurífero de Caiamar, Goiás (Rodrigues 2011).

O depósito aurífero de Caiamar está situado no Brasil Central e está relacionado ao *greenstone belt* de Guarinos pertencente ao Bloco Arqueano-Paleoproterozoico de Goiás, dentro da Província Tocantins (Figura 02).

O Bloco Arqueano-Paleoproterozoico de Goiás é subdividido em seis complexos de ortognaisses que separam os *greenstone belts* de Crixás, Guarinos, Faina, Pilar e Serra de Santa Rita (Pimentel *et al.* 2003).

Danni & Ribeiro (1978) propuseram a primeira divisão estratigráfica para o *greenstone belt* de Guarinos, sob a denominação de Grupo Pilar de Goiás. As informações litológicas eram consideradas igualmente para os *greenstone belts* de Crixás e Pilar de Goiás. Após revisão dos conteúdos litológicos, Jost & Oliveira (1991) subdividiram o Grupo Pilar de Goiás nos grupos Crixás, Guarinos e Pilar de Goiás.

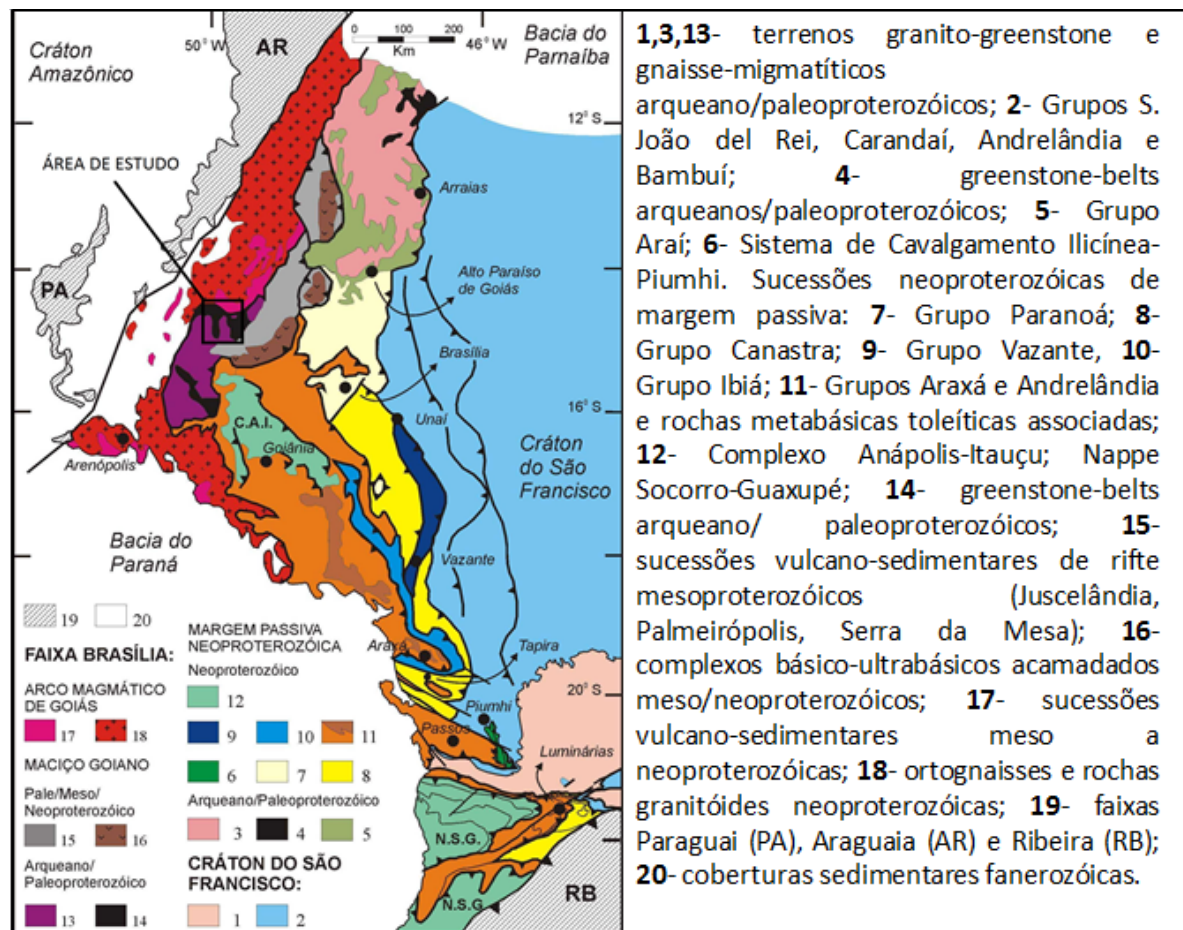


Figura 02 – Unidades tectônicas da Faixa Brasília (Valeriano *et al.* 2004).

Segundo Rodrigues (2011), o Grupo Guarinos foi subdividido, da base para o topo, nas formações Serra do Cotovelo e Serra Azul, que reúnem, respectivamente, metakomatiitos e metabasaltos e nas formações São Patricinho, Aimbé e Cabaçal que representam as rochas metassedimentares. O metamorfismo das rochas do Grupo Guarinos é da fácies xisto verde a xisto verde superior.

Posteriormente, Jost *et al.* (2011) subdividiram a Formação Cabaçal em membros Inferior, Intermediário e Superior e introduziram a Formação Mata Preta, representada por metagrauvacas homogêneas no topo da Formação Cabaçal (Figura 03).

Segundo Jost *et al.* (2011), o membro inferior da Formação Cabaçal é composta por filitos carbonosos ora homogêneos, ora laminados, com intercalações de arenitos finos. O estratotipo do membro intermediário consiste de rochas químicas em meio aos filitos carbonosos. Estas rochas são compostas por gonditos, metacherts e formações ferríferas de fácies magnetita-hematita. O membro superior da Formação Cabaçal é representado por filitos carbonosos homogêneos similares aos do membro inferior, (Jost *et al.* 2011).

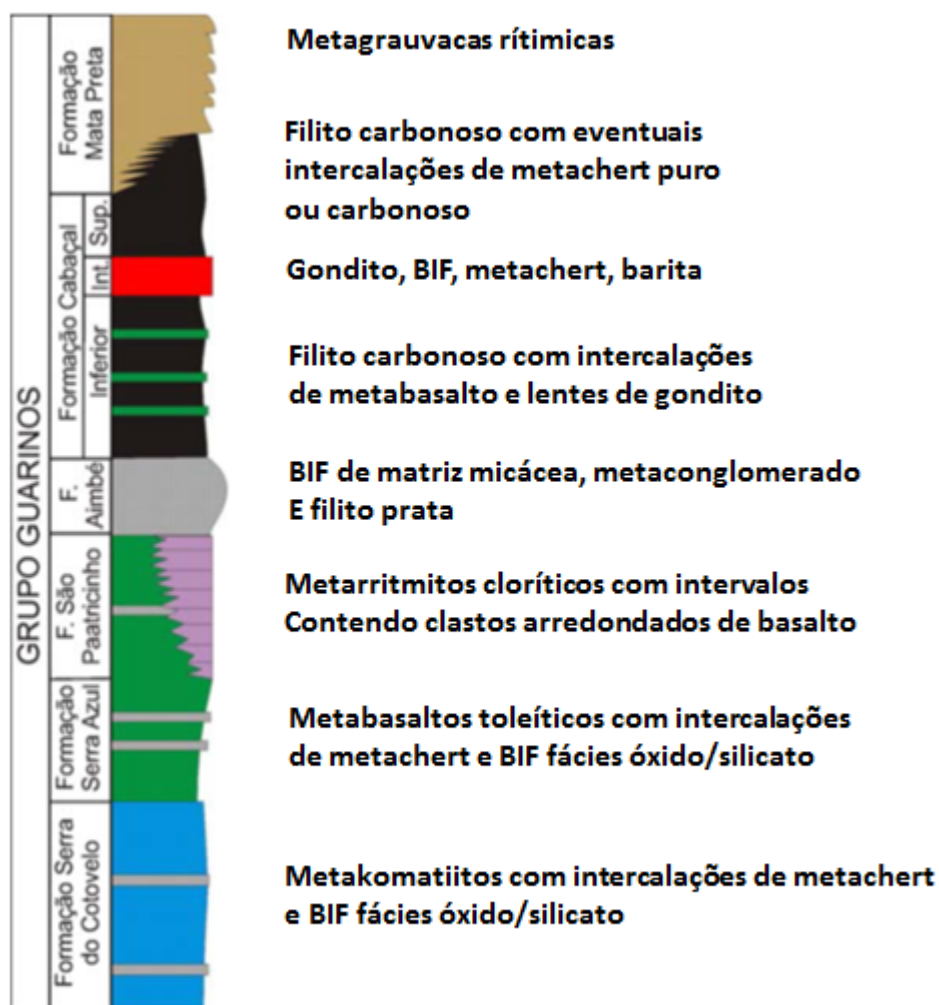


Figura 03 – Coluna estratigráfica do *greenstone belt* de Guarinos segundo Jost *et al.* (2011).

A Formação Mata Preta apresenta como estratotipo metarenitos e metassiltitos impuros (metagrauvacas) com algumas intercalações de dolomito. O limite entre as Formações Cabaçal e Mata Preta é gradacional uma vez que as mesmas apresentam contato por interdigitação lateral (Jost *et al.* 2011).

As mineralizações auríferas do depósito de Caiamar estão hospedadas predominantemente nas metagrauvacas pertencentes à Formação Mata Preta e em zonas de forte alteração hidrotermal dentro da Formação Cabaçal, de modo disperso (Rodrigues 2011).

3.2 Amostragem

A amostragem é uma etapa essencial na avaliação de depósitos minerais e tem como objetivo determinar a geometria do corpo mineralizado, a sua extensão, os seus teores e sua distribuição espacial (Yamamoto & Rocha 2001). O planejamento de amostragem deve considerar as características geológicas do tipo de depósito para que sejam coletadas informações de forma sistemática. O tipo de amostragem mais usual de depósitos minerais é a sondagem, que é realizada ao longo de uma malha pré-estabelecida para o tipo de depósito estudado, esta malha pode ser regular ou irregular. A sondagem rotativa é o método mais utilizado devido ao custo razoável e a boa recuperação de testemunhos indeformados. A partir dos testemunhos dos furos de sondagem, são realizadas análises químicas para os elementos de interesse e com isto é possível desenvolver as análises estatística e geoestatística dos mesmos. Também se obtém as informações geológicas de subsuperfície a partir das descrições dos testemunhos de sondagem. Outros métodos de amostragem corriqueiramente utilizados nos depósitos minerais são trincheiras, canais, galerias exploratórias e cachimbos.

O erro de amostragem está presente desde a retirada da amostra no campo até a sua análise em laboratório. Koch & Link (1971) dividem os erros de amostragem em erros de preparação e erros analíticos. Os erros de preparação representam as etapas de redução da amostra geológica, representadas por processos de quarteamento, homogeneização e outros processos que padronizem a amostra para ensaios. Os erros analíticos compreendem erros na calibração dos equipamentos utilizados nas análises ou nos reagentes presentes no processo.

3.3 Validação dos dados

A validação dos dados deve considerar todas as etapas da exploração mineral, verificando se os métodos utilizados são representativos para o tipo de depósito estudado (Handley *et al.* 1987). É necessário analisar a qualidade das análises químicas; certificar a localização exata das amostras; observar se a densidade de informações garante a continuidade da mineralização entre outros procedimentos. No banco de dados, devem-se verificar as profundidades dos furos, desvios das sondagens, se há lacunas (*gap*) nas amostras enviadas para a análise química ou descrições litológicas, se há presença de sobreposições (*overlap*) de intervalos devido a erros de digitação. Todos estes fatores podem comprometer as etapas seguintes de modelagem geológica e estimativa de teores do depósito, pois a geometria do corpo mineralizado ou a distribuição de teores ao longo do depósito seriam interpretadas de forma errônea.

3.4 Modelagem geológica 3D

A modelagem geológica tridimensional consiste na geração de sólidos de superfície irregular a partir da interpolação de dados 2D representados por diversas seções ao longo do corpo estudado (Houlding 1994).

As seções são construídas através das informações litológicas dos furos de sondagem, com orientações definidas pelo conhecimento geológico da região estudada. Assim, é possível gerar sólidos (*wireframes*) através de algoritmos de triangulação que conectam as seções a partir dos limites litológicos estabelecidos (Houlding 1994).

Os sólidos elaborados permitem o cálculo de volumes dos corpos modelados, seja minério ou estéril. Posteriormente, constrói-se o modelo de blocos com base nos processos de estimativa e nele representam-se informações consideradas necessárias para o modelo do depósito, como teor, densidade e informações litológicas. As principais vantagens destes modelos são atualizar constantemente, elaborar diversos cenários de estudo e ajustar o modelo para novos dados adquiridos.

3.5 Análise estatística

O alicerce da estatística e da geoestatística é representado pela amostragem, que pode ser compreendida como a seleção de partes representativas do todo que se deseja estudar, tendo sempre em vista a ordem econômica (Yamamoto & Rocha 2001).

Segundo Barnes (1980), a teoria da amostragem é fundamentada no conceito que, se um número significativo de dados representativos de uma população é selecionado sem enviesamento, o valor médio destes dados se aproximará da média da população. Os valores das amostras podem ser compreendidos como variáveis aleatórias.

A análise estatística permite fazer inferências sobre a variabilidade do fenômeno estudado a partir da distribuição de frequências que pode ser caracterizada através de estatísticas descritivas. A distribuição de frequências pode ser simples ou acumulada e representa a forma com que unidades de uma população estão distribuídas dentro de um intervalo de amostragem (Yamamoto, Bettencourt & Montanheiro 2001).

As estatísticas descritivas são divididas em: medidas de tendência central (média, mediana e moda), medidas de dispersão (variância, desvio padrão e coeficiente de variação) e medidas de forma (curtose e assimetria).

A moda é o valor, ou classe de valores, mais frequentes encontrados em uma amostra. A mesma pode ser amodal (sem valores de moda), modal (uma moda), bimodal

(duas modas) ou polimodal (mais que dois valores de moda). A mediana corresponde a 50% da frequência acumulada da distribuição de valores amostrais. A média de uma amostra pode ser expressa por:

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

A variância de uma variável indica o quanto o valor é distante da média e pode ser calculada por:

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

O desvio padrão apresenta a mesma unidade dos valores originais e é calculado como a raiz quadrada da variância:

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

O coeficiente de variação é uma medida adimensional e expressa a dispersão relativa de valores em torno da média. O CV é calculado através da divisão do desvio padrão pela média:

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

Através do coeficiente de variação, é possível determinar a variabilidade natural de depósitos minerais e permite compará-los e classificá-los segundo tal variabilidade (Yamamoto, Bettencourt & Montanheiro 2001).

A distribuição de frequências pode ser classificada a partir de sua assimetria. A assimetria é medida através do nível de simetria de uma distribuição de valores em torno da média, que pode ser normal, positiva ou negativa. Quando positiva, a cauda da distribuição está localizada à direita da média e compreende grandes concentrações de teores baixos e pequenas concentrações de valores altos. Este tipo de assimetria é geralmente encontrado em depósitos de metais raros como urânio, ouro, elementos do grupo da platina entre outros. A assimetria negativa é caracterizada pela cauda da distribuição estar à esquerda da média, com teores altos em maior frequência que teores baixos, por exemplo, em depósitos de ferro (Yamamoto, Bettencourt & Montanheiro 2001).

3.6 Análise geoestatística

A geoestatística foi definida inicialmente para estimativa de depósitos minerais, porém, atualmente é aplicada em diversas áreas como: hidrogeologia, petróleo, geotecnia e agronomia.

A geoestatística permite ajustar uma função aleatória que melhor representa as realizações da variável aleatória, que depende das coordenadas espaciais. Os fenômenos espaciais podem envolver teores de minério, concentrações de poluentes etc (Yamamoto 2001).

As variáveis regionalizadas são variáveis aleatórias que dependem da sua localização no espaço, podendo ser representadas por uma função matemática com continuidade que varia de ponto a ponto. Esta função pode ser denominada como variograma e descreve o comportamento espacial da variável regionalizada. Esta variável apresenta características qualitativas: localização geográfica, suporte (unidade amostral básica que a variável é medida como área ou volume), continuidade (variância espacial) e anisotropias (Bubeniceck & Haas 1969).

O produto da análise geoestatística é o modelo teórico de variograma que é a função que melhor se ajusta à correlação espacial dos dados de amostragem.

A função variograma é obtida a partir da comparação entre pares de pontos consecutivos, separados por uma distância h em uma direção analisada. Segundo Journel & Huijbregts (1978), a função semivariograma é definida como metade da função variograma e pode ser expressa por:

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

em que $\gamma(h)$ é a função semivariograma, $Z(x)$ é o valor da variável aleatória no ponto x e $Z(x+h)$ é valor da variável em um ponto separado por uma distância h do ponto x .

O gráfico de variograma experimental representa as diferenças entre pares de pontos em função de distâncias (h) pré-definidas em direções estabelecidas. O modelo teórico de variograma é ajustado ao experimental para obter parâmetros que definem o comportamento espacial da variável regionalizada e, é o instrumento utilizado na estimativa de teores (Yamamoto 2001). As principais propriedades do variograma representadas na Figura 4 são segundo Yamamoto (2001):

- **Patamar:** É a variância em que o variograma estabiliza-se, indicando ausência de correlação espacial. O patamar tem início a partir da amplitude.
- **Amplitude:** É a distância de separação entre o campo aleatório e o campo estruturado do variograma. A partir desta distância as amostras não apresentam correlação entre si, tornando-se independentes.
- **Efeito Pepita:** É a variância entre amostras próximas a distâncias nulas, a qual pode ser resultado do acúmulo de erros de amostragem ou, ainda, à variabilidade natural dos depósitos.
- **Variância Espacial:** É a diferença entre o patamar e o efeito pepita.

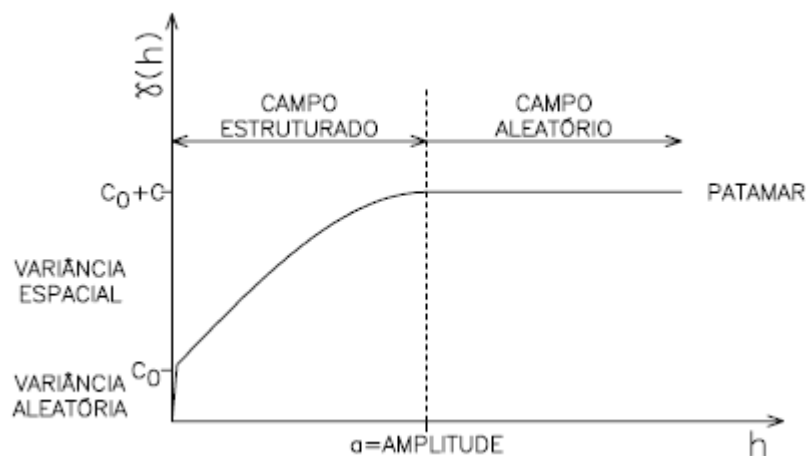


Figura 4 – Propriedades do variograma (Yamamoto 2001).

Variogramas experimentais calculados em direções distintas podem resultar em diferenças nas propriedades e estas caracterizam a anisotropia. A anisotropia pode ser zonal, quando o patamar varia conforme a direção, porém a amplitude é constante; geométrica, quando diferentes amplitudes são encontradas, sob um mesmo patamar; e mista, quando os patamares e amplitudes são diferentes para cada direção, conforme ilustrado na Figura 5.

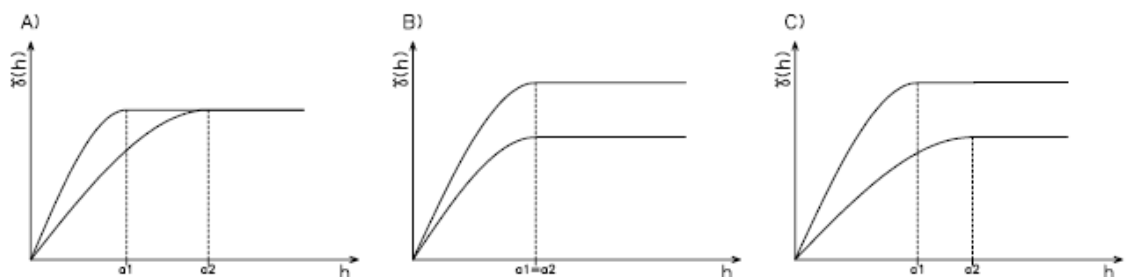


Figura 5 – Tipos de anisotropias: geométrica (a), zonal (b) e mista (c) (Yamamoto 2001).

3.7 Validação cruzada

A validação cruzada permite a aferir a qualidade do ajuste do modelo teórico de variograma para o tipo de informação trabalhada, além de determinar os parâmetros de vizinhança a serem utilizados na estimativa. O método consiste em estimar um ponto de valor conhecido eliminando-se seu valor da base de dados. Repetindo-se para todos os pontos do conjunto, um dos resultados possíveis é um diagrama de dispersão de valores estimados em função de valores reais. O resultado esperado seria de pontos alinhados à reta bissetriz de 45° e com máxima correlação possível (Yamamoto 2001). Entretanto, esta situação não é alcançada e a dispersão dos dados em torno daquela reta permite inferir se a estimativa superestimou ou subestimou os valores (Figura 6).

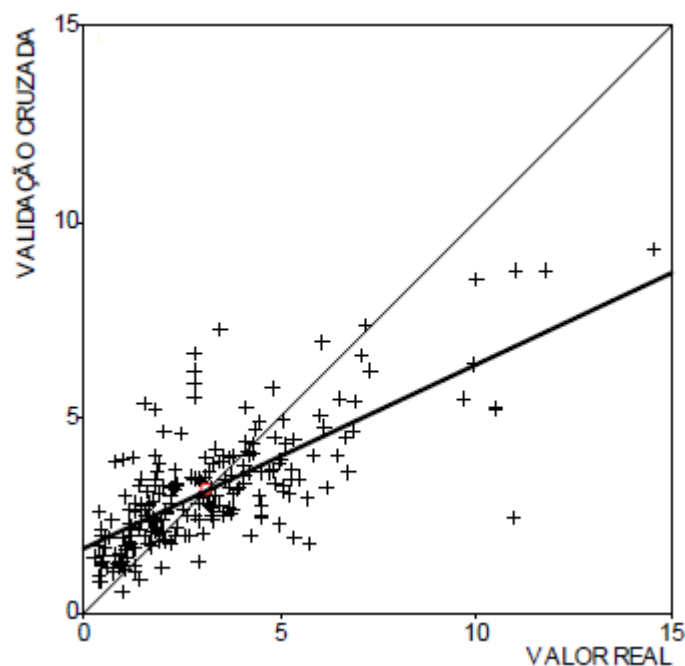


Figura 6 – Resultado típico da Validação Cruzada. Notar a dispersão dos valores em torno da reta bissetriz de 45°, indicando a subestimativa dos valores.

3.8 Krigagem ordinária

A Krigagem ordinária é um método computacional e local de estimativa, no qual um ponto não amostrado é estimado segundo a combinação linear de pontos presentes na vizinhança próxima (Yamamoto & Landim 2013). O estimador da Krigagem ordinária é:

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

onde $Z_{KO}^*(x_0)$ é o valor estimado no ponto x_0 , n é o número total de amostras selecionadas, λ_i é o ponderador da i -ésima amostra e $Z(x_i)$ é o valor da variável regionalizada da i -ésima amostra.

A Krigagem ordinária admite a condição de não viés, na qual a soma dos ponderadores seja igual a um:

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

O sistema de equações de krigagem ordinária em função da variância espacial pode ser escrito como:

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

onde $\gamma(x_n - x_n)$ é a variância espacial entre as amostras e é calculada a partir do modelo teórico de variograma, λ_i é o ponderador da krigagem ordinária associado à i -ésima amostra, μ é o multiplicador de Lagrange, $\gamma(x_0 - x_n)$ é a variância espacial entre o ponto/bloco a ser estimado e a n -ésima amostra. O valor do ponto estimado pode ser definido através dos ponderadores encontrados a partir do sistema de equações (Yamamoto & Landim 2013).

Segundo Yamamoto (2001), uma importante etapa do processo de estimativa é a definição da vizinhança local, que compreende os pontos que serão utilizados pelos métodos de interpolação. A busca errada destes pontos pode acarretar resultados distintos e gerar agrupamentos de amostras. A escolha da vizinhança deve ser feita de modo que garanta o bom espalhamento espacial dos dados e que atenda aos critérios de estimativa. Esta busca pode ser dividida em quadrantes ou octantes, por exemplo.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

As informações utilizadas no projeto são baseadas na geologia regional do depósito, furos de sonda, amostras de canais e no mapeamento de galerias da mina.

O banco de dados utilizado na elaboração do modelo geológico tridimensional do depósito é composto por: coordenadas dos furos, descrições geológicas dos testemunhos de sondagem com interpretação da litologia, desvio dos furos, análises químicas do elemento de interesse do depósito (Au), informações de alteração e profundidades finais dos furos. As amostras de canais e os dados de mapeamento das galerias, junto com as sondagens, foram utilizados na elaboração da envoltória de teores das estruturas mineralizadas do depósito. Este banco de dados foi cedido pela empresa Yamana Desenvolvimento Mineral S/A.

O modelo geológico e as envoltórias de teores do depósito foram criados no programa Datamine Studio 3[®]. As etapas de análise estatística, análise geoestatística, validação cruzada, criação do modelo de blocos e estimativa de teores por krigagem ordinária foram executadas no programa Isatis[®]. Ambos os programas foram utilizados no Laboratório de Informática Geológica do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo (LIG-USP) e nos computadores da empresa Yamana Desenvolvimento Mineral S/A.

Os métodos utilizados para a análise estatística foram aqueles estabelecidos, difundidos e aceitos pela comunidade geocientista que trabalha com avaliação de recursos/reservas minerais e estimativas. Deste modo, as estatísticas descritivas foram calculadas além da elaboração dos histogramas da variável de interesse.

A análise geoestatística também seguiu o preceituado pela comunidade que trabalha com este tipo de análise, ou seja o variograma experimental foi calculado, a princípio pela análise exploratória dos dados visando a definição de anisotropia. Esta análise iniciou-se com o cálculo do variograma experimental para quatro direções no plano horizontal e uma direção ortogonal, não coplanar. As direções no plano horizontal foram 0°, 45°, 90° e 135° com tolerâncias angulares de 22,5°. Definiram-se, depois, apenas três direções, duas coplanares e uma ortogonal não coplanar para o ajuste do modelo teórico de variograma.

Feito o ajuste do modelo teórico de variograma, calculou-se a validação cruzada para, como já descrito, aferir o ajuste do modelo teórico de variograma e definir os parâmetros de vizinhança para então realizar o cálculo das estimativas por krigagem ordinária e interpretá-la, com os sólidos interpretados na modelagem tridimensional.

5. DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

O projeto iniciou-se com uma atividade de campo de trinta dias com foco na geologia do depósito e acompanhamento de amostragem. Em seguida, realizou-se a elaboração e validação do banco de dados a ser utilizado na modelagem geológica do depósito.

A confecção do modelo geológico tridimensional iniciou-se após a validação do banco de dados. O desenvolvimento do modelo geológico permitiu a modelagem detalhada das estruturas mineralizadas e serviu como guia na interpretação das mesmas.

Os sólidos das estruturas mineralizadas A1 e A2 exibiram alguns problemas quanto à presença de teores abaixo do teor de corte inclusos no modelo. Portanto, houve a necessidade da revisão dos *wireframes* e decidiu-se elaborar uma envoltória de teores (*grade Shell*).

Após a realização da envoltória dos corpos A1 e A2 realizou-se o mapeamento das galerias da mina com a finalidade de melhor delimitar os contatos das zonas mineralizadas em regiões ainda não amostradas do depósito.

Após a modelagem tridimensional realizaram-se a análise estatística e a análise geoestatística.

O modelo de blocos foi criado a partir de um protótipo determinado pelas coordenadas mínimas e máximas dos furos de sondagem e, posteriormente, foi cortado dentro dos *wireframes* de cada estrutura mineralizada do depósito. Por fim, o modelo de blocos gerado foi cortado abaixo da superfície do terreno e foram calculados o teor médio e a tonelagem de cada estrutura mineralizada.

As atividades foram realizadas dentro do período estipulado no início do trabalho de formatura e estão resumidas na Tabela 1.

Tabela 1 – Cronograma atualizado do trabalho de formatura.

Cronograma de atividades realizadas em 2013											
Atividade / Mês	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maió	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro
Pesquisa e revisão bibliográfica											
Trabalho de campo											
Geração e validação do banco de dados											
Modelagem geológica											
Modelagem de teores											
Trabalho de campo											
Elaboração do Relatório de Progresso											
Análise estatística											
Análise geoestatística											
Estimativa de teores											
Discussão dos dados											
Elaboração da Monografia											

 - Atividades realizadas

6. RESULTADOS OBTIDOS

6.1 Atividades de campo

Na primeira etapa de campo foram identificadas as principais litologias e estruturas associadas ao depósito aurífero em estudo. As principais rochas encontradas na região do depósito foram xistos grafitosos da Formação Cabaçal (Figura 07) e metagrauvacas da Formação Mata Preta.

Em alguns afloramentos de rochas da Formação Cabaçal foram encontrados metacherts, gonditos e turmalinitos intercalados com os xistos grafitosos, além de camadas de metabasalto associadas.

As metagrauvacas apresentaram-se como rochas de granulação média a grossa, com estiramento mineral bem marcado e composição mineralógica variada. Nas regiões de contato com as rochas da Formação Cabaçal, as metagrauvacas possuíam intercalações de xistos grafitosos e, muitas vezes, exibindo magnetita, talco e anfibólio em sua composição mineralógica.

As variações texturais e composicionais permitiram separar quatro unidades diferentes dentro das metagrauvacas da Formação Mata Preta: metagrauvacas com anfibólio, envolvendo rochas com concentrações variáveis de anfibólio e pequenas intercalações de anfibolitos dentro das mesmas; metagrauvacas com magnetita e talco; metagrauvacas com intercalações de xistos grafitosos e, por fim, metagrauvacas com paragênese composta por granada e biotita.

Interdigitadas lateralmente com a Formação Mata Preta, a Formação Cabaçal apresentou atitude média, no entorno do depósito, com direção N310 e mergulhos variando de 45° a 55°.



Figura 07 – Xisto grafitoso associado à sequência química das unidades do depósito de Caiamar.

Após a familiarização com as litologias, realizou-se o levantamento das principais estruturas observadas nas galerias da mina subterrânea. Localmente, foi encontrada uma família de fraturas ortogonais e diversos *boudins* de foliação (Figura 08), além de forte sulfetação, presente nas metagrauvacas da Formação Mata Preta, relacionada às acumulações auríferas (Figura 09).

Os diversos *boudins* de foliação chamaram a atenção para o tipo de mineralização do depósito, pois nas zonas dos *necks* dos *boudins* observaram-se diversas sulfetações que diretamente implicam na distribuição dos teores dentro das zonas mineralizadas.

As metagrauvacas mineralizadas exibiram cristais de arsenopirita ora na matriz da rocha, ora sobrecrecidos na mesma, compondo bolsões estirados ao longo da foliação (Figura 10).



Figura 08 - *Boudin* de foliação do tipo losangular. Notar as fraturas ortogonais à foliação na porção direita da figura, indicadas pelas setas vermelhas.

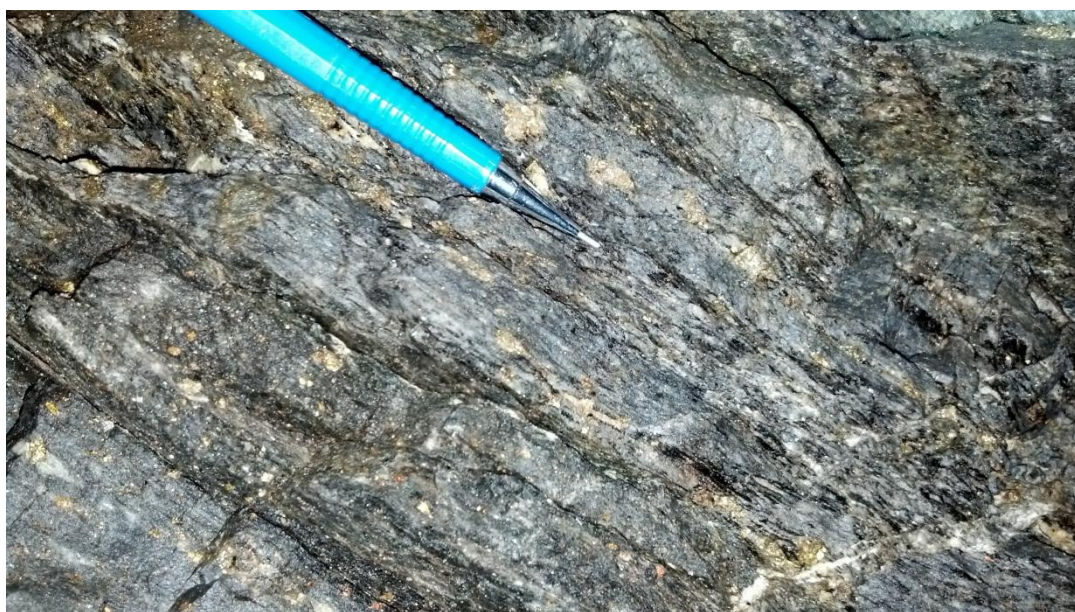


Figura 09 – Cristais de arsenopirita ao longo da foliação da metagrauvaca (GRV).

Posteriormente, houve o acompanhamento das etapas de amostragem de canais nas galerias da mina e de sondagem rotativa na região em torno do depósito. Nesta fase, testemunhos de sondagem (Figura 11) foram analisados e descritos com a finalidade de definir a relação de contatos entre as rochas do depósito e em quais níveis a mineralização está hospedada.



Figura 10 – Bolsões de arsenopirita estirados ao longo da foliação da metagrauvacas (GRV).



Figura 11 – Testemunho de sondagem que expõe zona mineralizada na metagrauvaca (GRV).

6.2 Validação dos dados

As informações dos testemunhos de sondagem foram utilizadas na confecção de uma tabela que resume todas as litologias envolvidas na região da mina.

A elaboração do banco de dados consistiu no agrupamento de todas as informações das sondagens realizadas na região do depósito para serem utilizadas na interpretação e elaboração do modelo geológico tridimensional.

Como as informações sobre os furos de sondagem foram divididas em *collar*, *survey*, *assay*, *lithology* e *alteration* e o volume de dados era muito grande, foi necessário fazer a validação dos mesmos com a finalidade de verificar a presença de erros de digitação ou ausência de valores em campos-chave do banco de dados.

Alguns furos foram descartados por não apresentarem informações de análises químicas, caracterização geológica ou ausência de desvios e conforme listados na Tabela 2.

Tabela 2 – Furos excluídos do banco de dados.

Furo:	Ausência de:		
	Desvio	Análise química	Descrição litológica
CA_33A		X	X
CA_37	X	X	X
CA_81_A	X		
CA_81_F		X	X
CA_81_G		X	X
CA_88	X		
CA_110	X		
CA_112	X	X	
CA_115_A		X	X
CA_118	X	X	
CA_119		X	X
CA_121	X	X	
CA_122	X	X	
CA_123	X	X	
CA_124	X	X	
CA_125	X	X	
CA_127	X	X	
CA_129	X	X	
CA_130	X	X	

6.3 Modelo geológico 3D

A partir da validação dos dados gerou-se um arquivo de furos no programa Datamine Studio 3[®] e para este arquivo foi criada a legenda que pode ser observada na Tabela 3. Esta legenda teve a finalidade de facilitar o trabalho com as principais litologias, pois foram agrupadas litologias menos expressivas associadas a cada unidade litológica principal. Este agrupamento permitiu a simplificação do modelo geológico tridimensional, uma vez que estas litologias menos expressivas não apresentavam continuidade entre seções e furos de sonda e apareciam de forma pontual dentro de cada unidade citada na Tabela 3.

A modelagem geológica iniciou-se com a definição de seções W-E espaçadas de 30 metros conforme a malha de sondagem utilizada. As seções foram interpretadas a partir da região do depósito com maior densidade de furos (Figura 12).

Tabela 3 – Unidades litológicas utilizadas na modelagem geológica tridimensional.

BANCO DE DADOS - LITOLOGIAS/CAIAMAR		
Código_Lito	Litotipo	Descrição
AGRV	Metagrauvaca com anfibólio (Granada-biotita xisto com anfibólio)	Cor cinza a verde escuro, granonematoblástico/lepidoblástico, com granulação média à grossa e porfiroblastos de granada, vênulas quartzo-carbonáticas. Pirrotita (Po) ocorre maciça em algumas porções com anfibólio e quartzo associados.
GRV	Metagrauvaca (Granada-biotita xisto)	Cor cinza, granolepidoblástico grosso com porfiroblastos de granada. Exibe vênulas de quartzo paralelas à foliação com arsenopirita (Aspy) associada. Aspy ocorre como cristais finos a grossos, geralmente dispersos nas vênulas. Turmalina e Po ocorrem associadas às vênulas em algumas porções. As principais mineralizações ocorrem nesta litologia.
GRVI	Metagrauvaca c/ intercalações de xisto grafitoso	Metagrauvaca com lentes grafitosas intercaladas. Cor cinza escuro, laminado, lepidogranoblástico fino com porfiroblastos, sulfetado, exibindo lâminas carbonosas, com pirita (Py) e Po dissolvidas ao longo das laminações, às vezes, formando níveis maciços milimétricos. Há veios de quartzo com cristais de anfibólio grossos e não orientados, porém, paralelos aos planos de foliação.
GX	Xisto grafitoso	Granada-grafita xisto, cinza escuro, lepidoblástico com porfiroblastos de granada milimétricos, exibindo Py e Po dispersas pela rocha.
MSP	Metassedimentos pelíticos	Biotita-sericita-clorita-anfibólio xisto, verde claro, com granulação fina, lepidoblástico fino. Magnetita ocorre localmente dispersa.
MTGRV	Metagrauvaca com magnetita e talco	Cor cinza claro pouco esverdeado, lepidogranoblástico fino com porfiroblastos milimétricos de granada. A proporção de clorita nesta rocha é variável, podendo até ser denominada como clorita xisto com magnetita, em algumas porções. Magnetita ocorre como cristais dispersos na matriz da rocha. Exibe discreta estrutura laminada, com níveis quartzosos e outros micáceos.

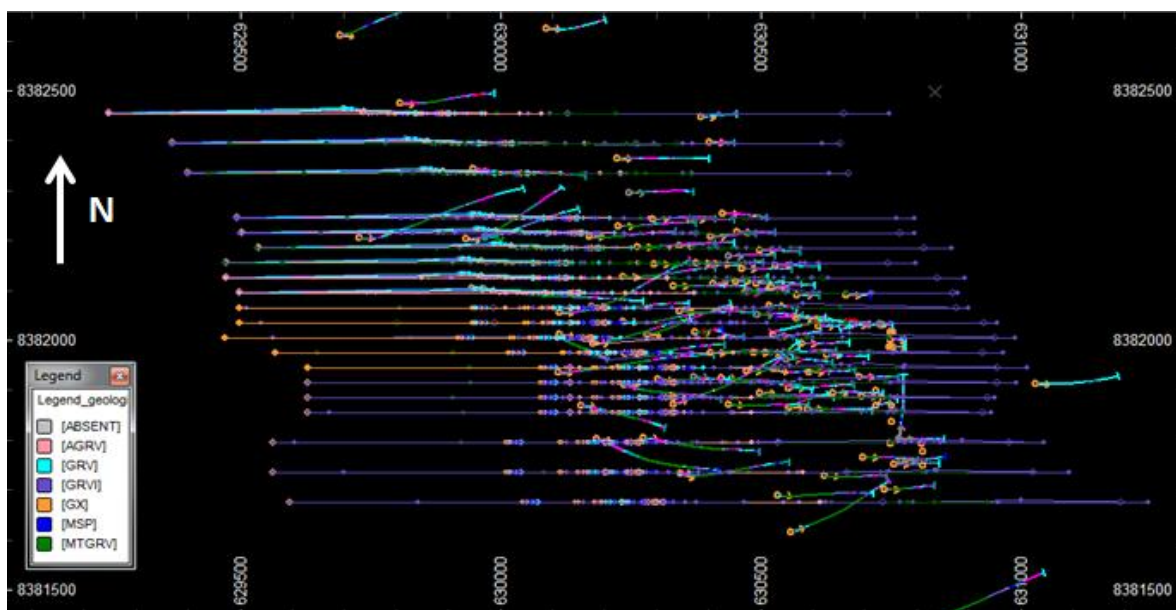


Figura 12 – Vista em planta das seções W-E definidas com espaçamento de 30 metros e os furos de sonda do depósito de Caiamar nelas contidos.

Ao longo de todo o depósito foram construídas vinte seções geológicas, nas quais estavam presentes desde as rochas da sequência química da Formação Cabaçal até as metagrauvacas da Formação Mata Preta.

A atividade de campo realizada na região da mina permitiu definir as relações de contato entre as rochas do depósito, auxiliando na interpretação das informações contidas nas sondagens e definição das seções geológicas.

A construção das seções geológicas teve início com a elaboração de uma seção-tipo do depósito (Figura 13). A partir dessa foram criados diversos planos de visada igualmente espaçados da seção-tipo.

Para comparar as seções, umas com as outras e ajustar de modo mais eficiente a continuidade lateral das unidades litológicas, projetou-se uma seção já elaborada em outros planos de visada.

As seções foram prolongadas além do limite da superfície do terreno com a finalidade de facilitar a triangulação das mesmas e, posteriormente, recortar o modelo geológico com os limites do terreno, proporcionando o ajuste mais preciso do modelo na topografia da região do depósito.

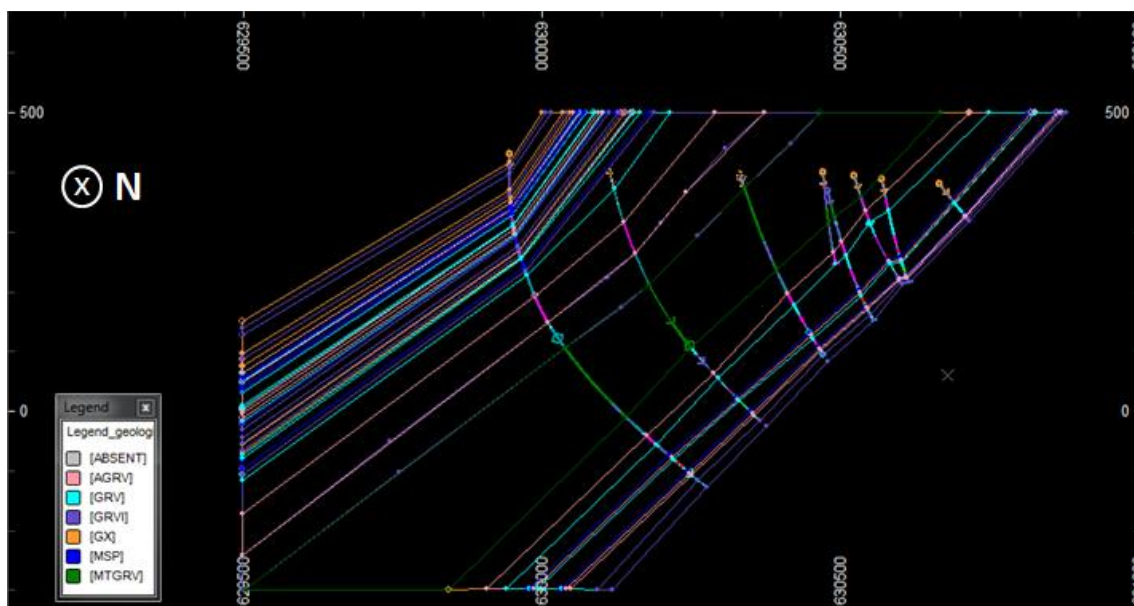


Figura 13 – Seção-tipo do depósito de Caiamar. Notar a intensa intercalação entre as litologias.

As seções foram interligadas entre si gerando sólidos triangulados para cada unidade litológica do depósito. Estes sólidos já renderizados podem ser observados na Figura 14.

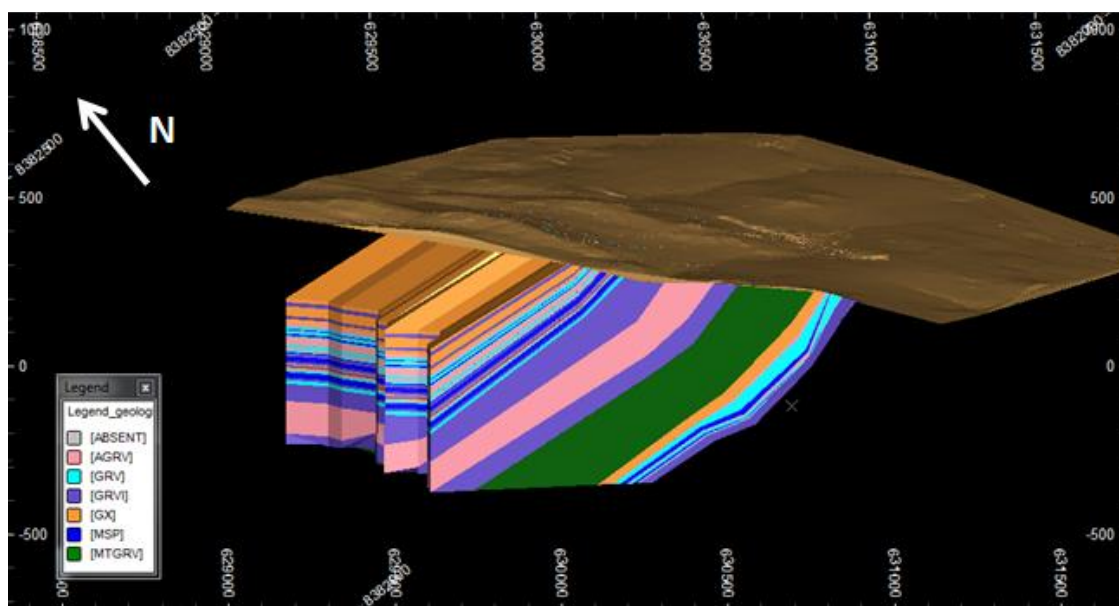


Figura 14 – Modelo geológico tridimensional do depósito aurífero de Caiamar.

A segunda etapa da modelagem geológica tridimensional foi elaborar as seções das estruturas mineralizadas hospedadas nas metagrauvacas presentes na base do modelo geológico, conforme destacado na Figura 15. Como camada-guia das estruturas mineralizadas é utilizado um nível de metassedimentos pelíticos (MSP) entre as metagrauvacas (GRV). Este nível separa as estruturas definidas como A1, nível mineralizado acima do MSP e A2, nível mineralizado abaixo da camada-guia (Figura 16).

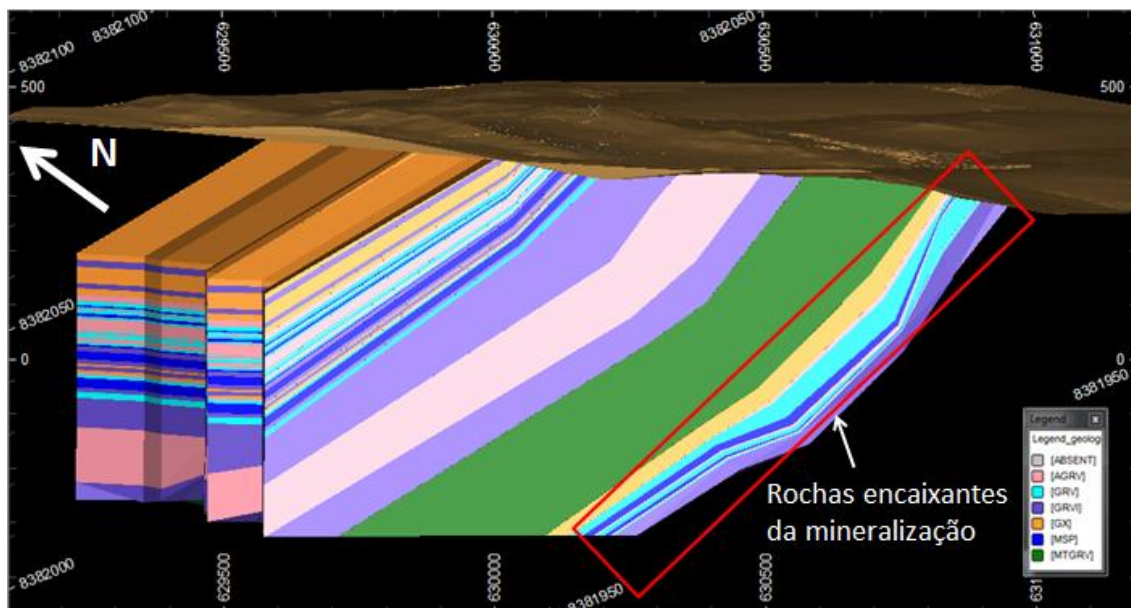


Figura 15 – Modelo geológico tridimensional do depósito com destaque para as estruturas mineralizadas hospedadas nas metagrauvascas.

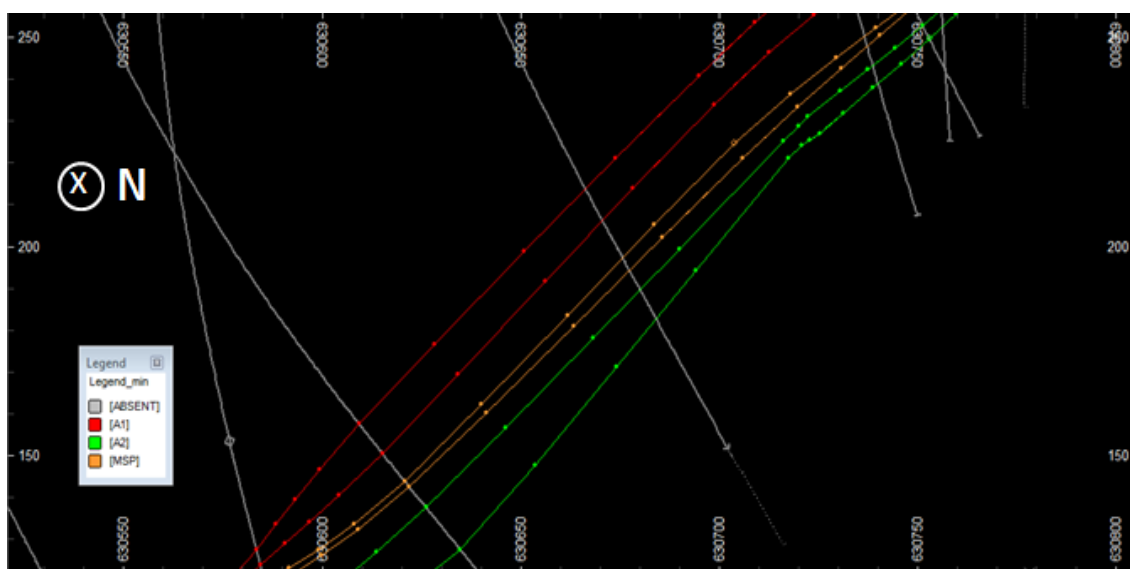


Figura 16 – Seção exibindo a camada-guia de MSP entre as duas estruturas mineralizadas A1 e A2.

As seções das estruturas mineralizadas foram criadas a partir das descrições presentes nos furos de sondagem, que associadas ao modelo geológico possibilitaram a confecção dos sólidos dos níveis mineralizados A1 e A2.

Informações como a continuidade das estruturas mineralizadas nas galerias da mina e a cava produzida na superfície do terreno permitiram delimitar a orientação destas estruturas.

6.4 Envoltória de teores

A validação dos modelos das estruturas mineralizadas ressaltou a necessidade de um novo critério na modelagem, pois ao se modelar as estruturas A1 e A2 descritas nas sondagens foi acrescentada uma grande parcela de baixos teores de ouro (estéril).

A fim de evitar o excesso de estéril nos sólidos da mineralização, definiu-se a envoltória de teores (*grade shell*) com teor de corte para o ouro de 0,5 g/t. Como as informações utilizadas no modelo geológico tridimensional são de longo-prazo, optou-se por acrescentar dados de furos de sondagem de curto-prazo e amostras de canais das galerias, ambos devidamente validados.

O espaçamento médio da malha de sondagem entre furos de curto-prazo é de 25 metros e a amostragem dos canais é realizada a cada 4 metros ao longo das galerias da mina.

Entre os meses de Junho e Julho, realizou-se outra atividade de campo com o objetivo de aprimorar a definição dos sólidos das estruturas mineralizadas e do modelo geológico tridimensional do depósito.

O modelo de teores das estruturas A1 e A2, Figuras 17 e 18, gerado a partir dos dados de furos de sondagem e canais apresentava espessura média menor que aquela observada nas galerias da mina. Portanto, decidiu-se realizar o mapeamento das galerias e digitalizar os limites da mineralização como forma de direcionar e refinar os sólidos.

Os sólidos gerados exibem alguns buracos devido à falta de informação ou à presença de furos de sondagem com teores abaixo do teor de corte. A mineralização em A2 exhibe algumas intercalações de estéril em meio ao *grade shell*, pois apresenta diversas lentes de alto teor intercaladas ao estéril. Como estas lentes são pouco espessas, optou-se por incluir as intercalações de estéril, mas garantindo que no processo de regularização das amostras o teor médio se mantivesse acima do teor de corte utilizado para a envoltória (Figura 19).

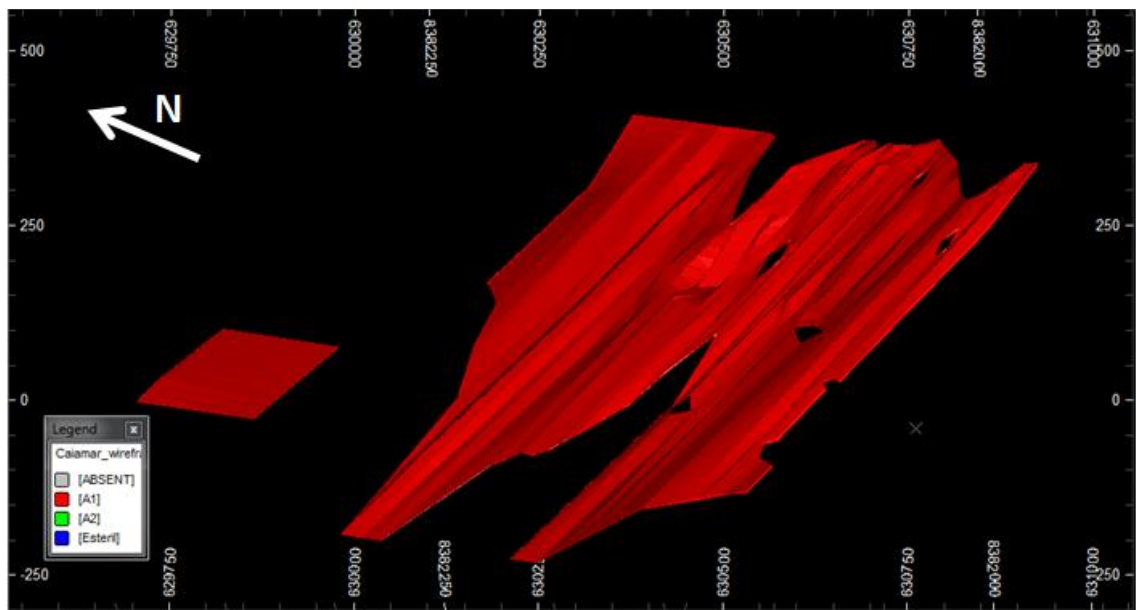


Figura 17 – Modelo de teores da estrutura mineralizada A1 do depósito de Caiamar.

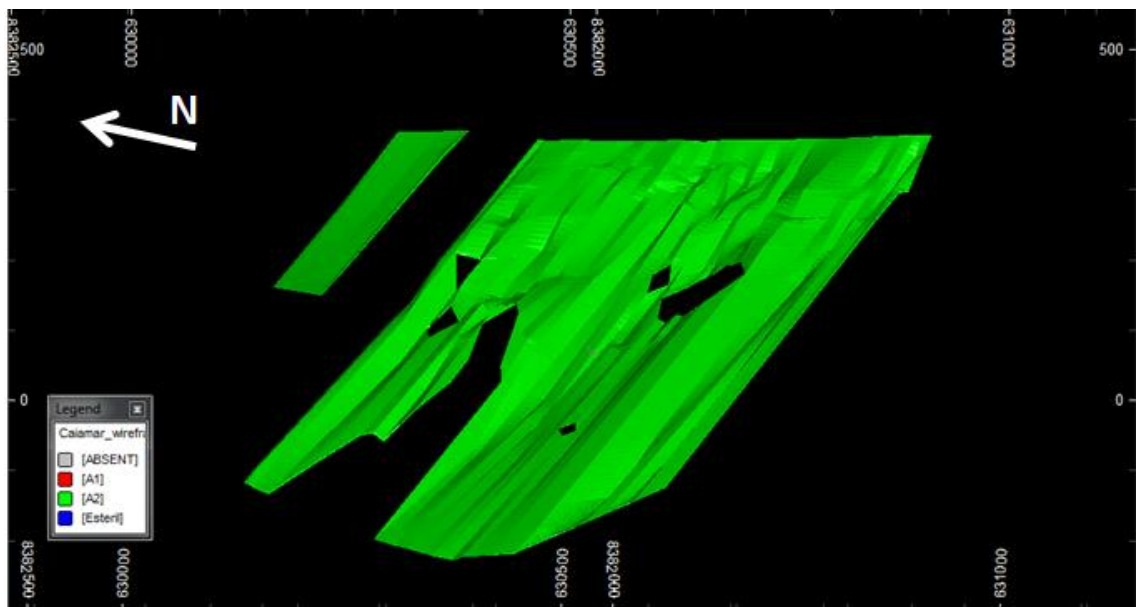


Figura 18 – Modelo de teores da estrutura mineralizada A2 do depósito de Caiamar.

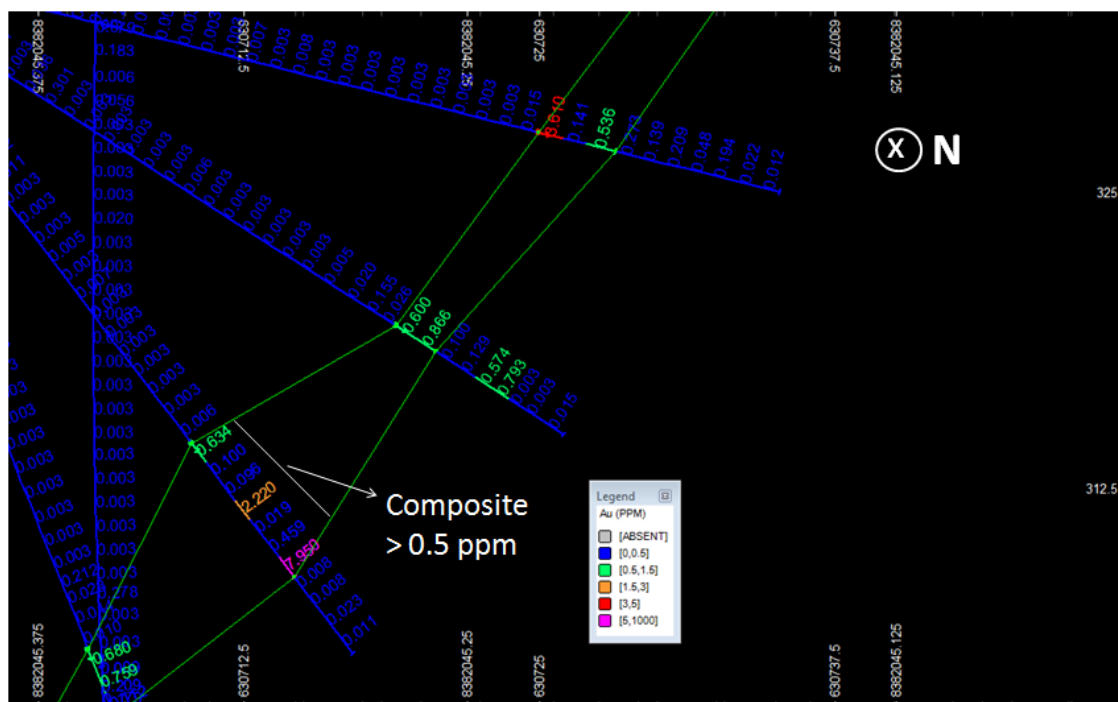


Figura 19 – Envoltória de teores incluindo amostras com teores abaixo de 0,5 ppm de Au, porém, quando regularizadas para a espessura da envoltória de teores o teor médio era maior que o teor de corte.

6.5 Análise estatística

Após a geração do modelo geológico tridimensional e envoltória de teores das estruturas mineralizadas do depósito, foi possível iniciar a análise estatística dos dados. As estatísticas descritivas para cada estrutura mineralizada e também para o estéril podem ser observadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Estatísticas descritivas das estruturas mineralizadas (A1 e A2) e estéril do depósito para o elemento Au (ppm).

	Nº de Amostras	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação
A1	601	0.0025	74.1000	3.4192	6.7284	1.9680
A2	437	0.0025	42.6000	1.5620	3.6475	2.3350
Estéril	45706	0.0000	55.7000	0.0487	0.5268	10.8160

A regularização das amostras foi realizada no programa Isatis®, por comprimento, em trechos de 1m, devido à espessura média das estruturas mineralizadas ser próxima a este intervalo. Os valores da variável Au regularizados apresentam a média de teores relativamente constante e diminuição da variância se comparados com os dados originais (Tabela 5).

Tabela 5 – Estatísticas descritivas das estruturas mineralizadas (A1 e A2) e estéril do depósito para o elemento Au (ppm). As amostras estão regularizadas para intervalos de 1 metro.

	Nº de Amostras	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação
A1	421	0,0025	71,3116	3,2541	5,9945	1,8420
A2	294	0,0025	42,6000	1,5384	3,5465	2,3050
Estéril	42280	0,0000	55,7000	0,0426	0,5039	11,8270

Os histogramas apresentam assimetria positiva, compatível com o tipo de depósito estudado, metais raros (Figura 20). Os valores de máximo das amostras podem corresponder a regiões do depósito nas quais há maior concentração de ouro.

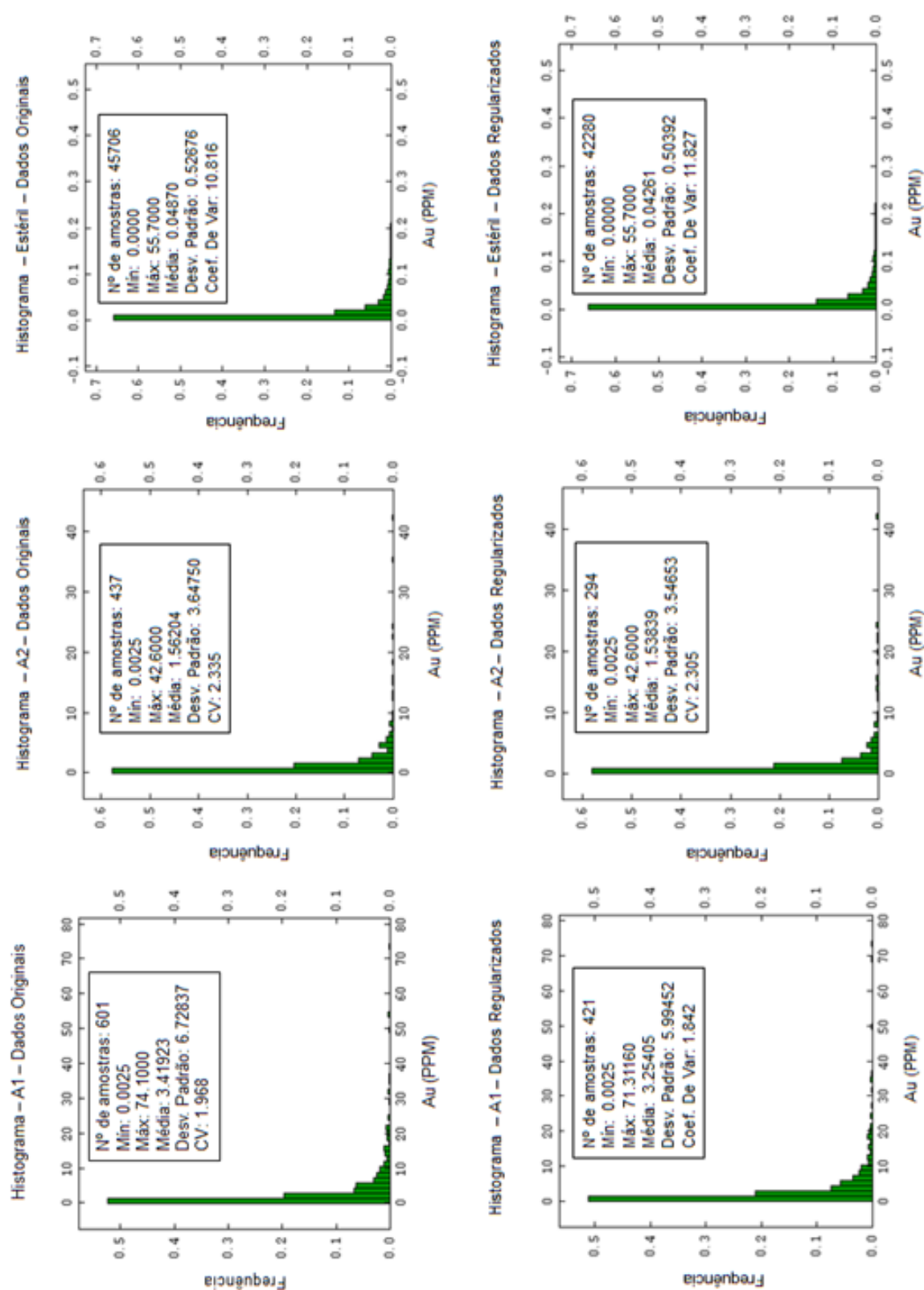


Figura 20 – Histogramas dos dados originais e regularizados para as estruturas mineralizadas A1 e A2 e para o estéril do depósito de Caia mar.

6.6 Análise geoestatística

A análise geoestatística da variável ouro foi efetuada a partir da seleção de dados internos às estruturas mineralizadas A1 e A2, que foram geradas na etapa da modelagem da envoltória de teores do depósito.

De início, foram efetuados variogramas experimentais em quatro direções regulares no plano horizontal (N0°, N45°, N90° e N135°) e no plano ortogonal ao de referência, com a finalidade de verificar a presença de anisotropia nos dados. Como os variogramas experimentais não apresentavam estruturação (Figura 21), não foi possível verificar a anisotropia.

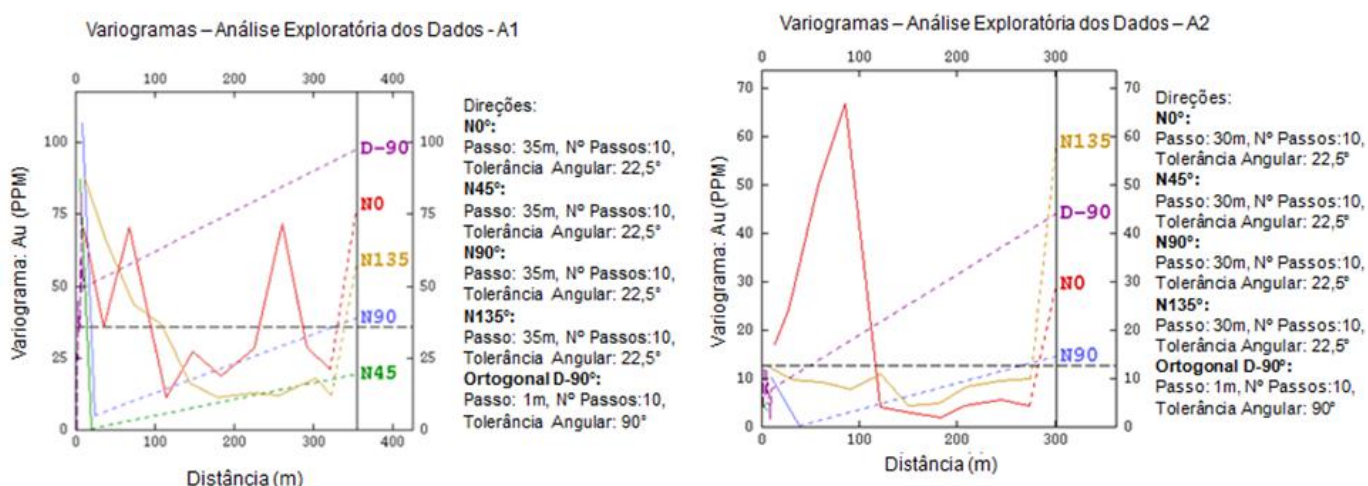


Figura 21 – Variogramas experimentais nas quatro direções regulares horizontais e no plano ortogonal às mesmas.

Como os variogramas experimentais calculados não apresentaram estrutura, decidiu-se calculá-los ao longo do plano médio das estruturas mineralizadas do depósito que possui direção N310, com inclinação média de 50° para SW. Os variogramas foram calculados para duas direções ortogonais neste plano e, mesmo assim, não se conseguiu definir a presença de anisotropia (Figura 22). Portanto, optou-se pelo cálculo do variograma omnidirecional no plano médio das estruturas mineralizadas adicionado de um variograma no plano ortogonal ao mesmo.

O campo geométrico observado para a estrutura A1 é de 350 metros e para a estrutura A2 é de 300 metros ao longo do plano de referência N310, devido a diferenças na continuidade entre estas estruturas mineralizadas. O campo geométrico do plano ortogonal ao de referência é variável, pois depende da profundidade máxima de cada furo de sondagem.

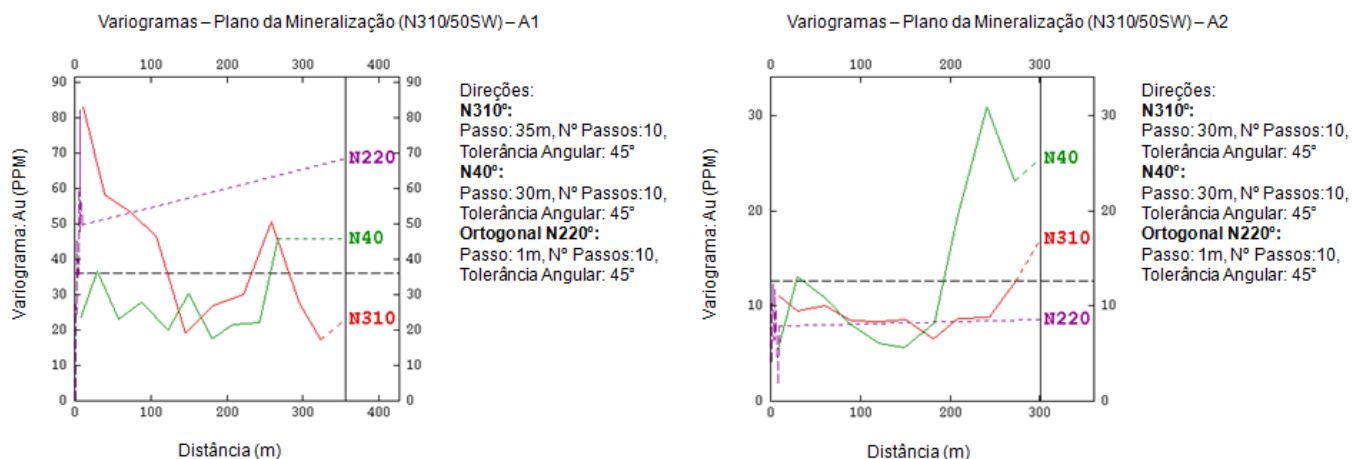


Figura 22 – Variogramas experimentais calculados em duas direções no plano da mineralização e no plano ortogonal às mesmas.

O tamanho dos passos foi ajustado de acordo com o espaçamento médio da amostragem dentro de cada estrutura mineralizada. Ao longo da estrutura mineralizada A1 o tamanho dos passos foi de 35 metros, já na estrutura A2 foram utilizados passos de 30 metros. No plano ortogonal ao de referência, o tamanho dos passos utilizado foi o intervalo de regularização das amostras, que é de 1 metro.

Os variogramas experimentais da variável Au ao longo do plano N310 e no plano ortogonal N220 são pouco estruturados e com amplitudes pequenas. Este fato pode ser compreendido devido ao espaçamento não regular da amostragem, o qual não abrange toda a extensão das estruturas mineralizadas e também a grande variabilidade natural do elemento estudado. Os variogramas do plano ortogonal (N220) perdem a estruturação em uma amplitude em torno de 2,5 metros, possivelmente devido à espessura média das estruturas mineralizadas ser de 2 metros.

Os modelos teóricos de variograma foram ajustados para as estruturas mineralizadas A1 e A2 segundo a direção do plano de referência N310 com mergulho de 50° para SW e para o plano ortogonal de direção N220. Em ambas as estruturas foram encontradas anisotropias mistas entre as direções estudadas e o modelo teórico de variograma utilizado em todos os casos foi o esférico (Tabela 6).

Estrutura	Elemento	Direção	Patamar	Amplitude (m)	Efeito Pepita
A1	Au	N310	11	50	11
		N220 (ortogonal)	27	2	
A2	Au	N310	1.3	40	2.5
		N220 (ortogonal)	8	2	

Modelo Teórico de Variograma – Plano da Mineralização (N310/50SW) - A1



Modelo Teórico de Variograma – Plano da Mineralização (N310/50SW) – A2

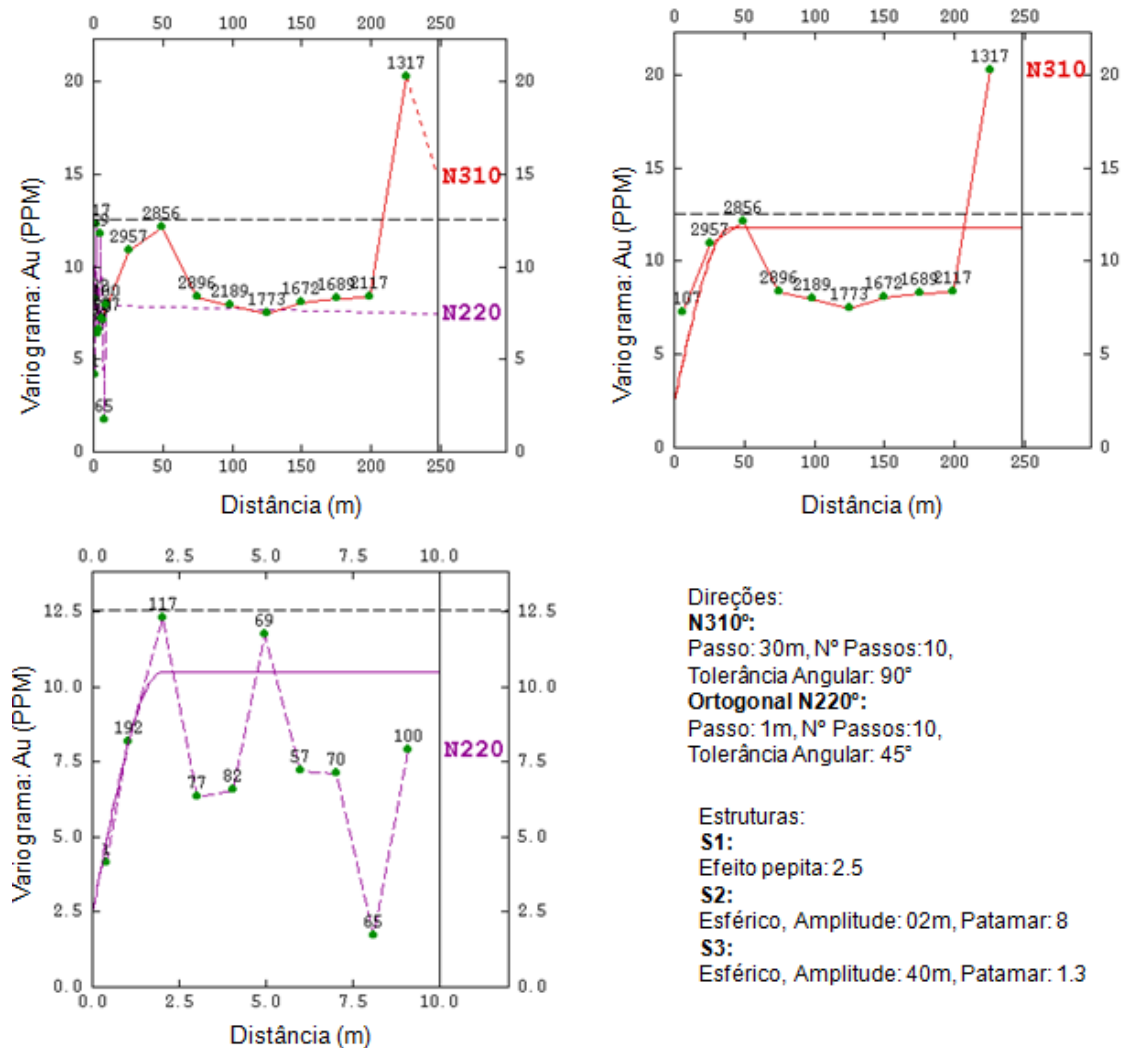


Figura 24 – Modelo teórico de variograma para a estrutura mineralizada A2.

6.7 Modelo de blocos

A elaboração do modelo de blocos para as estruturas mineralizadas consistiu na criação de um *grid* (protótipo) no programa Isatis® que compreendia um sólido tridimensional preenchido por blocos que envolvia as estruturas A1 e A2.

Como as estruturas mineralizadas A1 e A2 apresentam-se na forma de sólidos tabulares e com mergulho, decidiu-se criar um modelo de blocos rotacionado ao longo do plano de referência da mineralização, com direção N310 e com mergulho de 50° para SW. As dimensões dos blocos foram determinadas pela metade da distância média entre as sondagens na malha de amostragem e pelo intervalo de regularização das amostras (Tabela 7).

Tabela 7 – Dimensões do protótipo do modelo de blocos.

Direção	Dimensão do Bloco (m)	Nº de Blocos
X	20	73
Y	20	67
Z	1	677

O protótipo gerado no Isatis® foi exportado para o programa Datamine Studio 3® como arquivo de pontos. A criação do modelo de blocos neste programa necessitou a criação de novo protótipo com as mesmas dimensões daquele citado na Tabela 7.

Após a definição do protótipo foi criado o modelo de blocos que compreende as duas estruturas mineralizadas e realizou-se a intersecção dele com os sólidos das estruturas A1 e A2. Nas Figuras 25 e 26 é possível observar os modelos de blocos rotacionados cortados dentro de cada estrutura mineralizada.

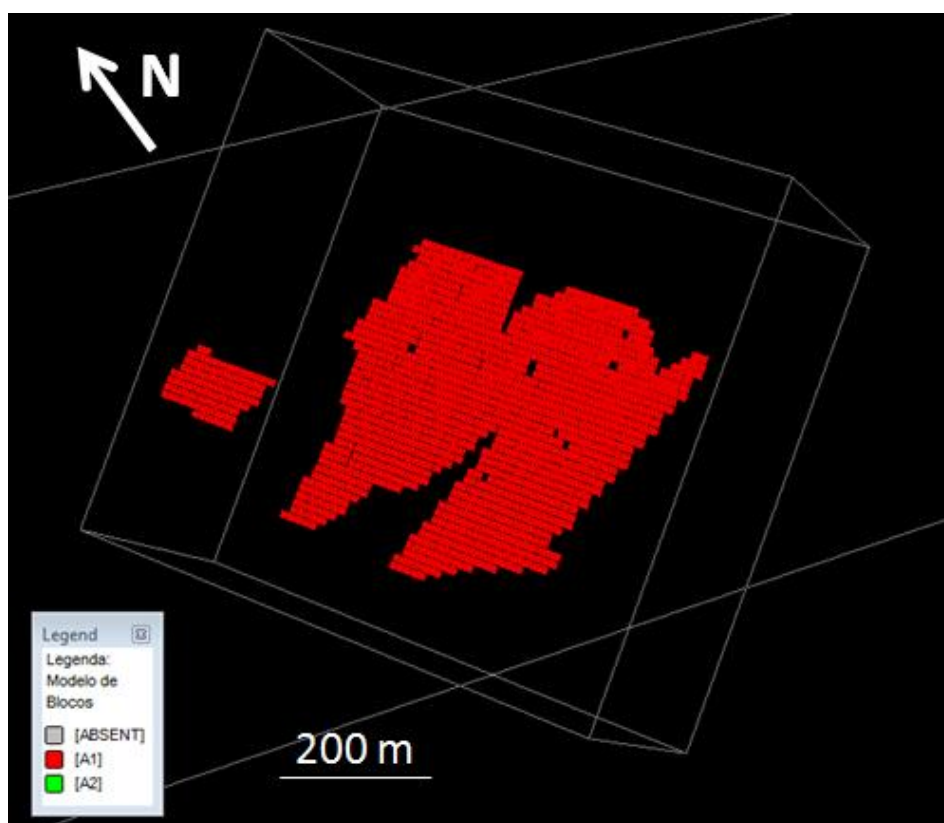


Figura 25 – Modelo de blocos rotacionado cortado dentro da estrutura mineralizada A1.

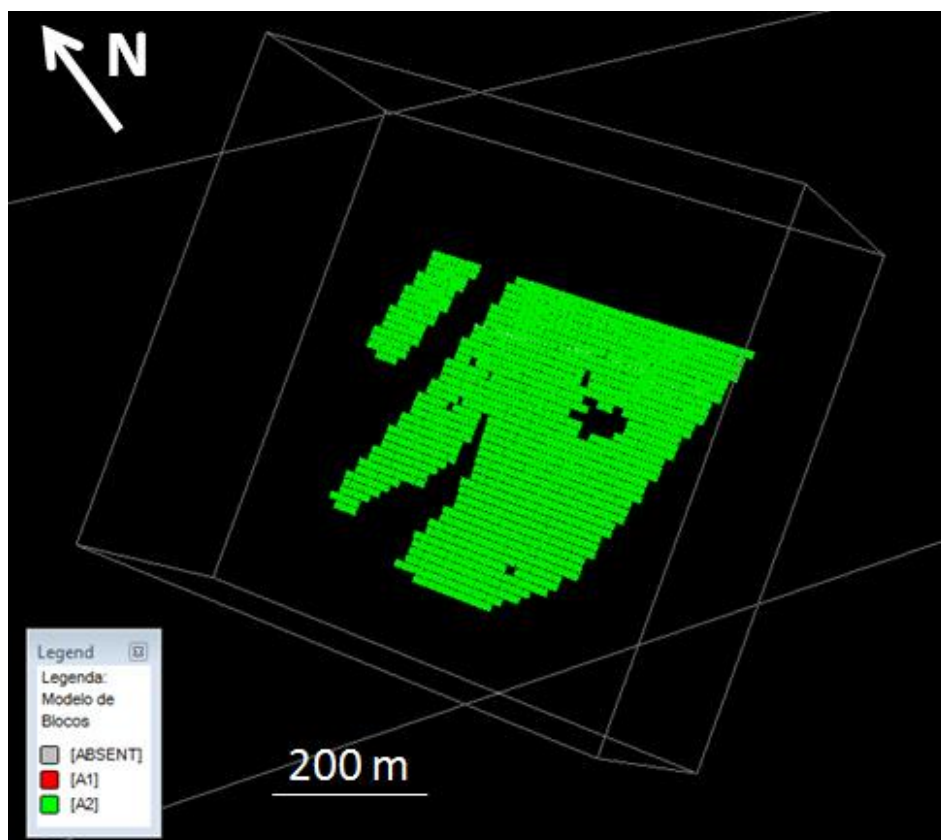


Figura 26 – Modelo de blocos rotacionado cortado dentro da estrutura mineralizada A2.

6.8 Validação cruzada

A validação cruzada foi elaborada com a finalidade de determinar os parâmetros de vizinhança a serem utilizados nas estimativas por krigagem ordinária e aferir a qualidade do ajuste do modelo teórico de variograma.

Inicialmente, os valores escolhidos para U, V e W (eixos do elipsoide que representa a anisotropia) foram determinados pelas amplitudes dos modelos teóricos de variograma ajustados para cada estrutura mineralizada e uma vizinhança conforme representado na Tabela 8, que respeita os limites do variograma para as distâncias onde havia dependência espacial.

Tabela 8 – Parâmetros de vizinhança iniciais utilizados na estimativa de teores das estruturas mineralizadas A1 e A2.

Parâmetro	Estrutura A1	Estrutura A2
U	50 m	40 m
V	50 m	40 m
W	2 m	2 m
Nº Mínimo de Amostras	8	8
Nº de Setores	4	4
Nº Ótimo de Amostras por Setor	4	4
Azimuth	310°	310°
Mergulho	50° SW	50° SW

Entretanto, o volume de dados estimados foi muito baixo e compreendeu apenas uma pequena região das estruturas mineralizadas A1 e A2. Este fato se deve ao espaçamento não regular entre as amostras, uma vez em que a elaboração da envoltória de teores utilizou amostras separadas em até 200 metros ao longo do mergulho das estruturas mineralizadas.

Um modo de aumentar o número de amostras a serem estimadas foi utilizar valores de U, V e W com o dobro das distâncias das amplitudes dos modelos teóricos de variograma. Além disto, utilizaram-se parâmetros menos restritivos, com a finalidade de aumentar a janela de busca e estimativa através da krigagem ordinária (Tabela 9).

Tabela 9 – Parâmetros de vizinhança utilizados na estimativa de teores das estruturas mineralizadas A1 e A2.

Parâmetro	Estrutura A1	Estrutura A2
U	100 m	100 m
V	100 m	100 m
W	4 m	4 m
Nº Mínimo de Amostras	3	3
Nº de Setores	4	4
Nº Ótimo de Amostras por Setor	1	1
Azimuth	310°	310°
Mergulho	50° SW	50° SW

Os valores ajustados dos parâmetros aumentaram o coeficiente de correlação se comparados aos parâmetros iniciais e, também o volume de dados estimados. O diagrama de dispersão da validação cruzada apresentou baixo coeficiente de correlação devido à alta variabilidade do elemento estudado, que exibe alguns teores elevados que foram subestimados e teores baixos que foram superestimados (Figura 27).

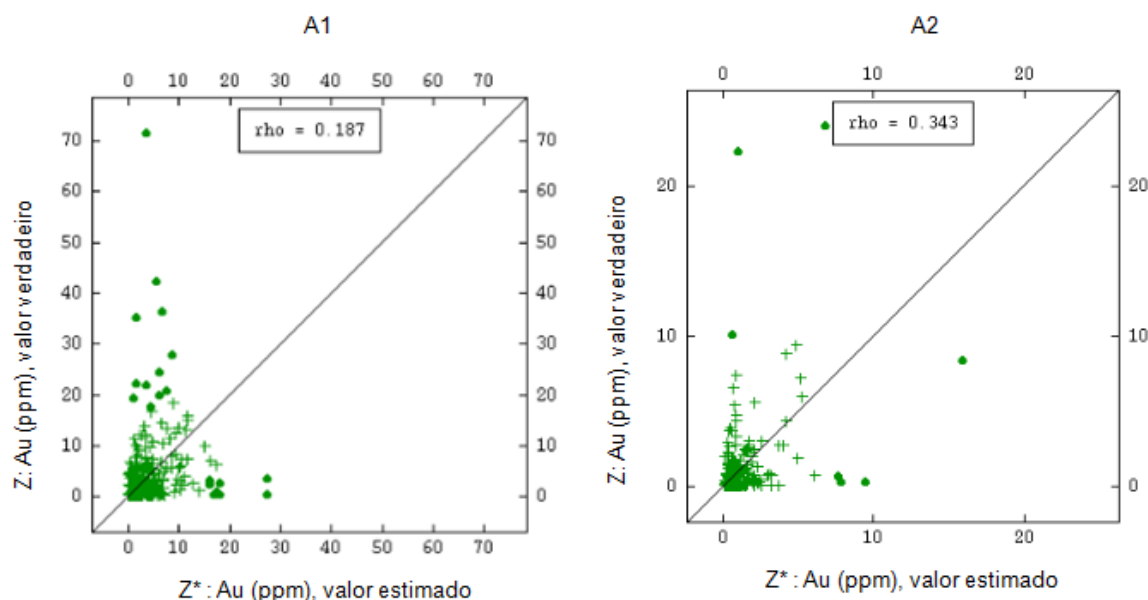


Figura 27 – Diagramas de dispersão da validação cruzada para a variável Au (ppm) das estruturas mineralizadas A1 e A2.

6.9 Krigagem ordinária

A estimativa de teores foi realizada através da krigagem ordinária de blocos, e para tal processamento utilizou-se o programa Isatis®.

Foram estimados dois modelos de blocos, um para a estrutura mineralizada A1 e outro para a A2, observados nas Figuras 28 e 29, respectivamente. A variável estimada foi Au (ppm) e os parâmetros utilizados foram os modelos teóricos de variograma, o modelo de blocos rotacionado e a vizinhança determinada na etapa de validação cruzada.

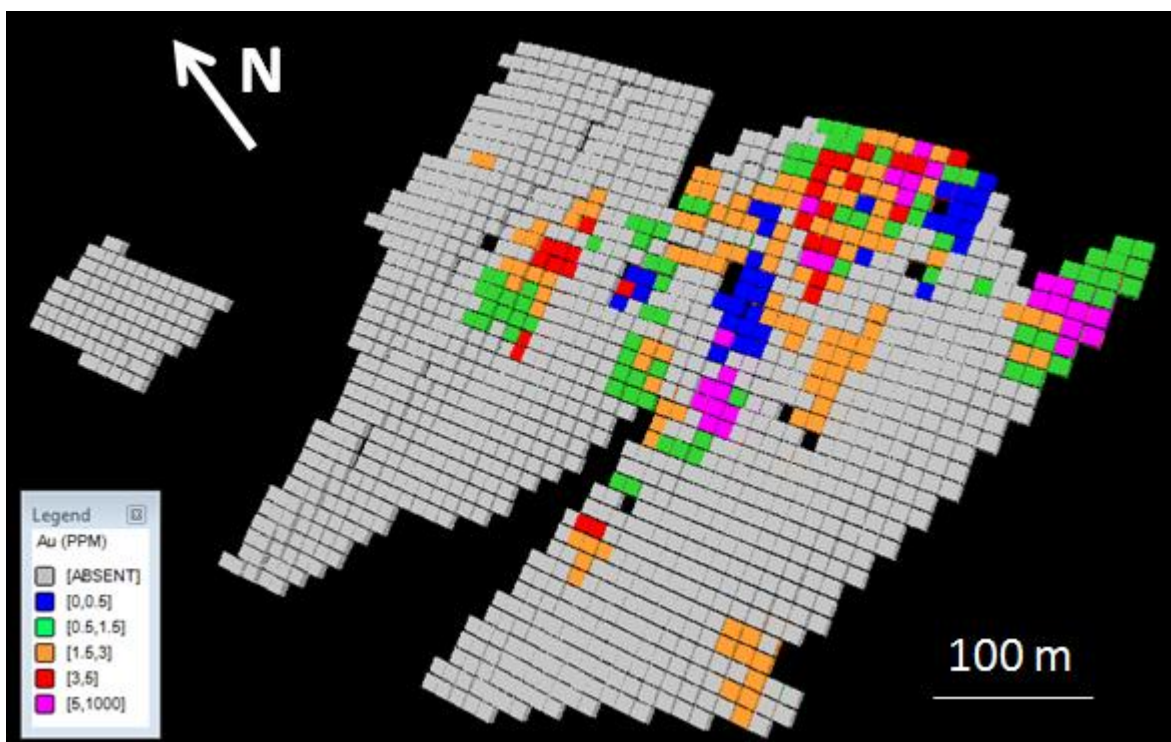


Figura 28 – Modelo de blocos estimado para variável Au (ppm) da estrutura mineralizada A1.

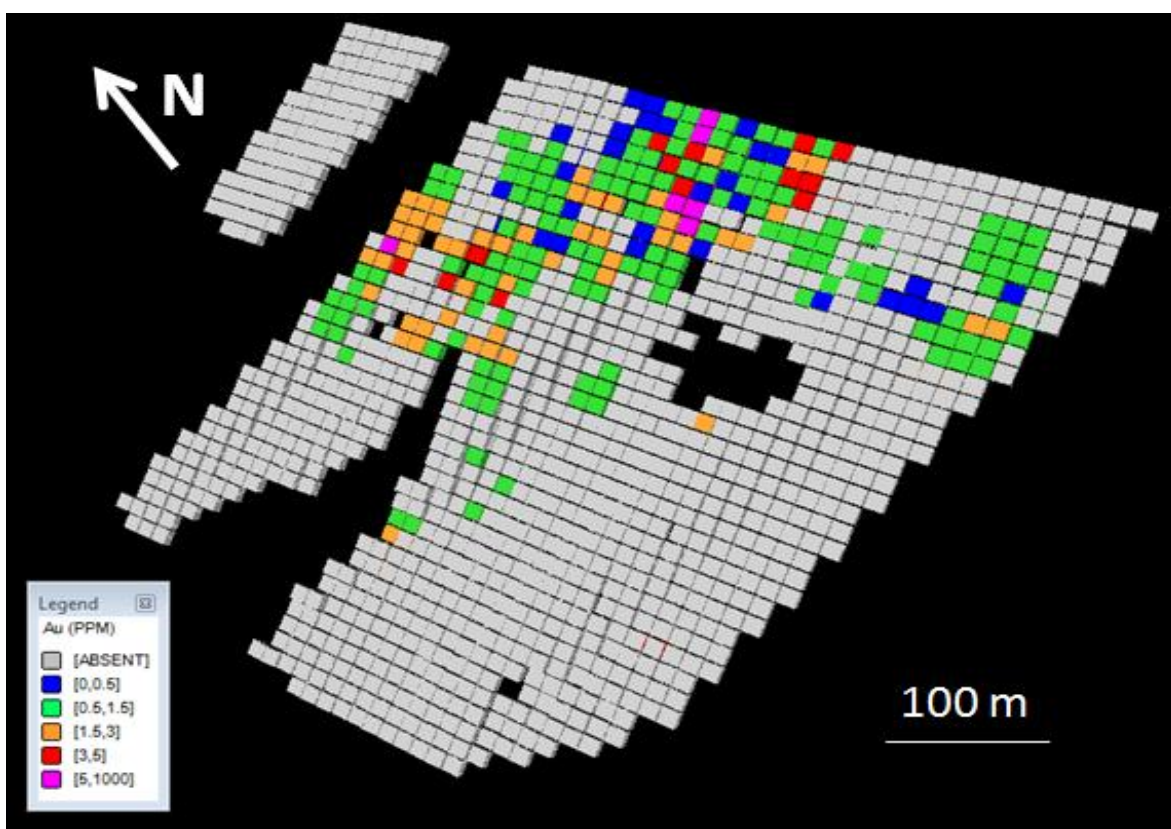


Figura 29 – Modelo de blocos estimado para variável Au (ppm) da estrutura mineralizada A2.

Devido ao espaçamento entre algumas amostras ser muito maior do que o alcance de busca da estimativa, diversos blocos não foram estimados, principalmente aqueles das regiões de borda da envoltória de teores.

A modelagem da envoltória de teores teve como objetivo utilizar teores de Au acima de 0,5 g/t (ppm) presentes nos furos de sondagem. Este critério refletiu diretamente nos modelos de blocos estimados, pois o alcance máximo utilizado nos parâmetros de vizinhança foi a distância equivalente ao dobro da amplitude do modelo de variograma, que é no máximo de 100 metros.

Na Figura 30 é possível observar que a distância entre alguns furos de sondagem na modelagem da envoltória de teores é maior do que o alcance máximo de busca utilizado na estimativa de teores da estrutura A1. Isto justifica o fato de diversos blocos não apresentarem valores da variável Au estimados.

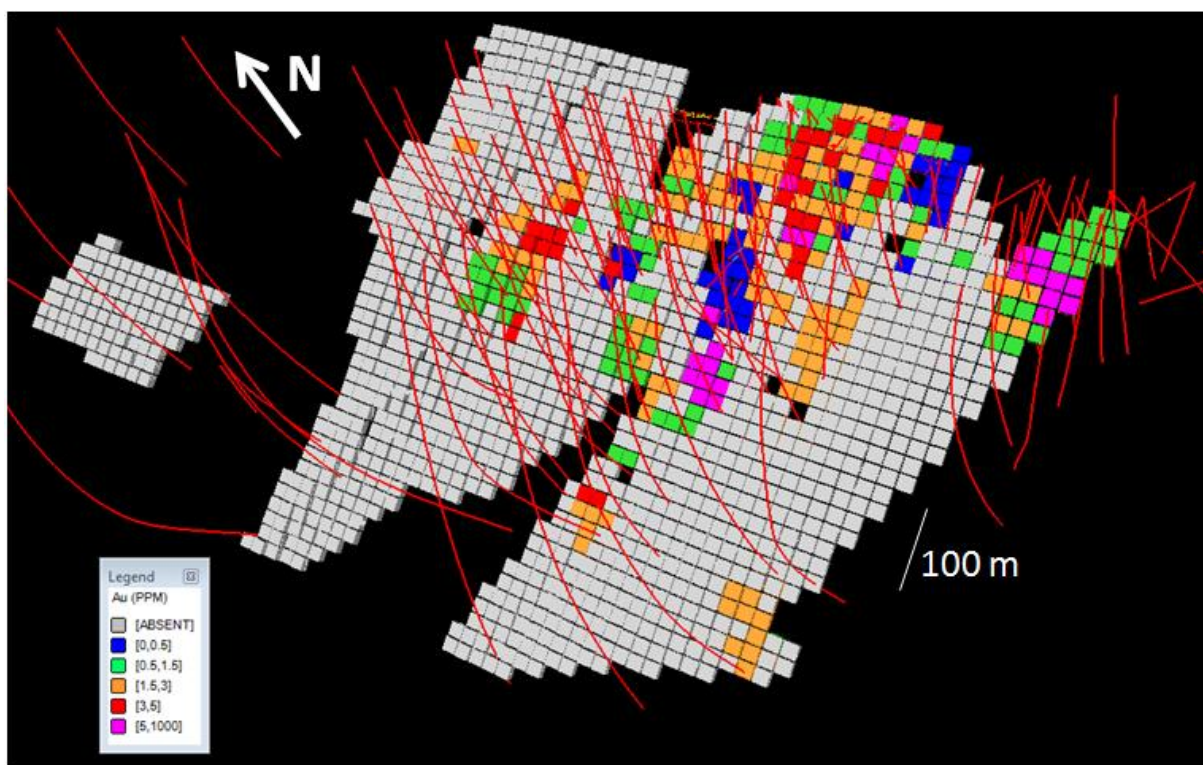


Figura 30 – Modelo de blocos estimado para a estrutura mineralizada A1, exibindo furos de sondagem que foram utilizados na modelagem da envoltória de teores. Notar que o espaçamento entre furos é muitas vezes maior que o alcance máximo da estimativa de teores.

Posteriormente, os modelos de blocos das estruturas mineralizadas foram cortados com a superfície do terreno com a finalidade de eliminar blocos estimados acima do limite da topografia. Nas Figuras 31 e 32 podem ser observados os modelos de blocos finais das estruturas mineralizadas A1 e A2 do depósito de Caiamar.

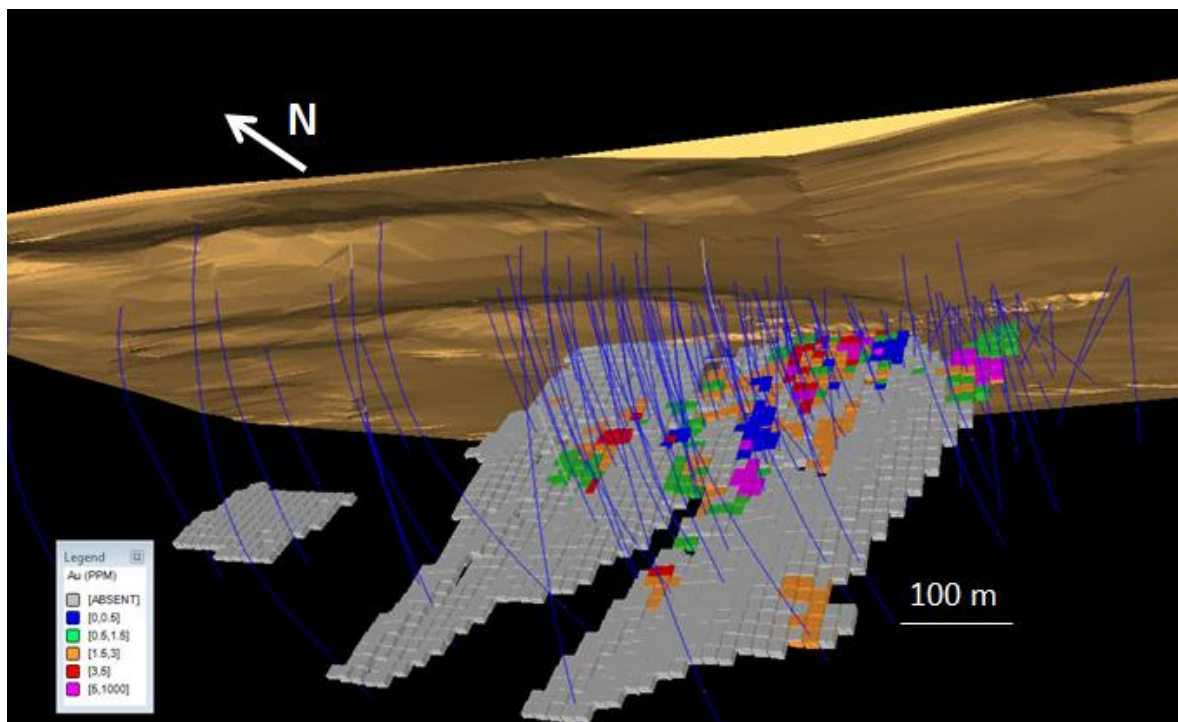


Figura 31 – Modelo de blocos da estrutura mineralizada A1 cortado com a superfície do terreno. Os furos de sondagem estão em azul.

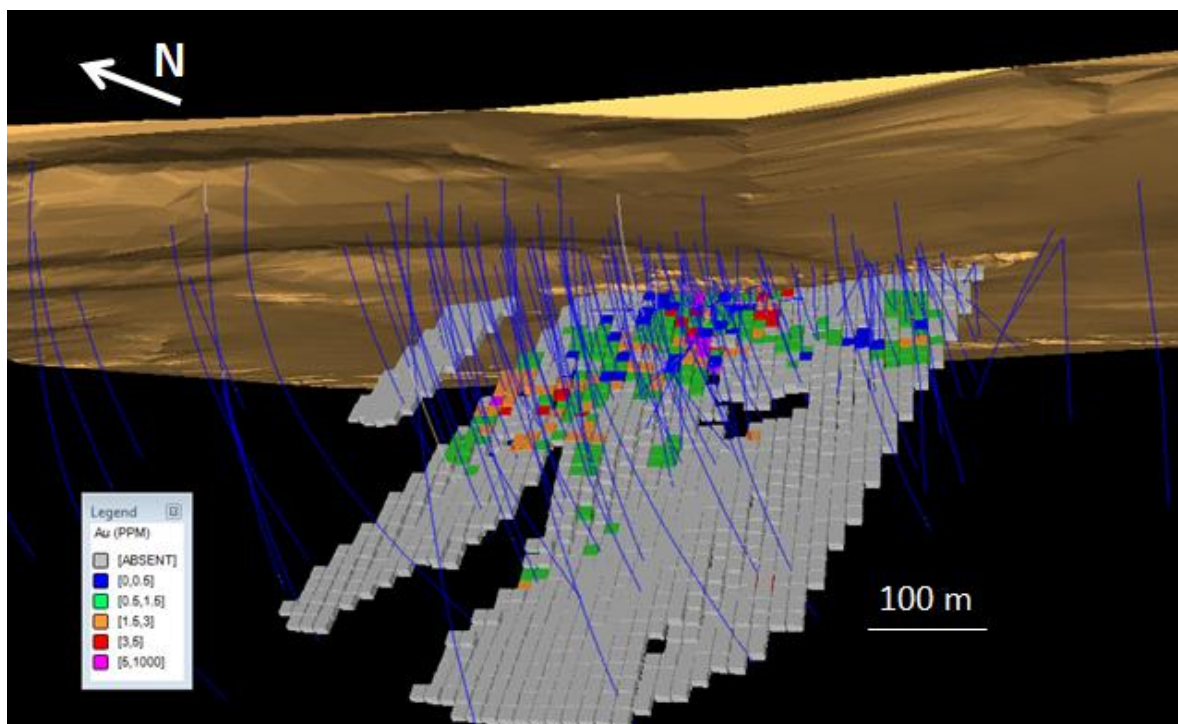


Figura 32 - Modelo de blocos da estrutura mineralizada A2 cortado com a superfície do terreno. Os furos de sondagem estão em azul.

7. Dificuldades encontradas

As principais dificuldades encontradas no trabalho desenvolvido foram a definição de um agrupamento para o grande número de litotipos descritos nos testemunhos de sondagem e a correlação lateral dos níveis mineralizados entre alguns furos.

Nos testemunhos foram descritas 15 litologias, incluindo as estruturas mineralizadas A1 e A2. No início da elaboração das seções geológicas notou-se a necessidade de agrupar algumas litologias com características similares.

Na Tabela 10, as rochas da sequência química como gonditos e metacherts foram incluídas na unidade de xisto grafitoso (GX). As metagrauvacas com variações na quantidade de anfibólio foram agrupadas na unidade AGRV (metagrauvacas com anfibólio). As estruturas mineralizadas e metagrauvacas finas passaram a compor a unidade GRV (metagrauvacas). As demais unidades se mantiveram como a descrição inicial.

Na construção dos contornos das estruturas mineralizadas houve incoerências de informações em algumas seções, nas quais o nível mineralizado A2 é contínuo e o furo registrava o nível A1 no mesmo intervalo, Figura 33.

Tabela 10 – Agrupamento de litologias presentes no depósito de Caiamar.

Litologias presentes:	Agrupamento proposto:
Metagrauvaca fina Metagrauvaca grossa	Metagrauvaca
Metagrauvaca c/ intercalações de xisto grafitoso	Metagrauvaca c/ intercalações de xisto grafitoso
Anfibolito Brecha anfibolítica Metagrauvaca com anfibólio	Metagrauvaca com anfibólio
Metassedimentos pelíticos	Metassedimentos pelíticos
Metagrauvaca com magnetita Metagrauvaca com talco	Metagrauvaca com magnetita e talco
Fácies algal Gondito Metachert Turmalinito Xisto grafitoso	Xisto grafitoso

Deste modo, a modelagem geológica tridimensional foi considerada a etapa de trabalho onde as maiores dificuldades foram encontradas.

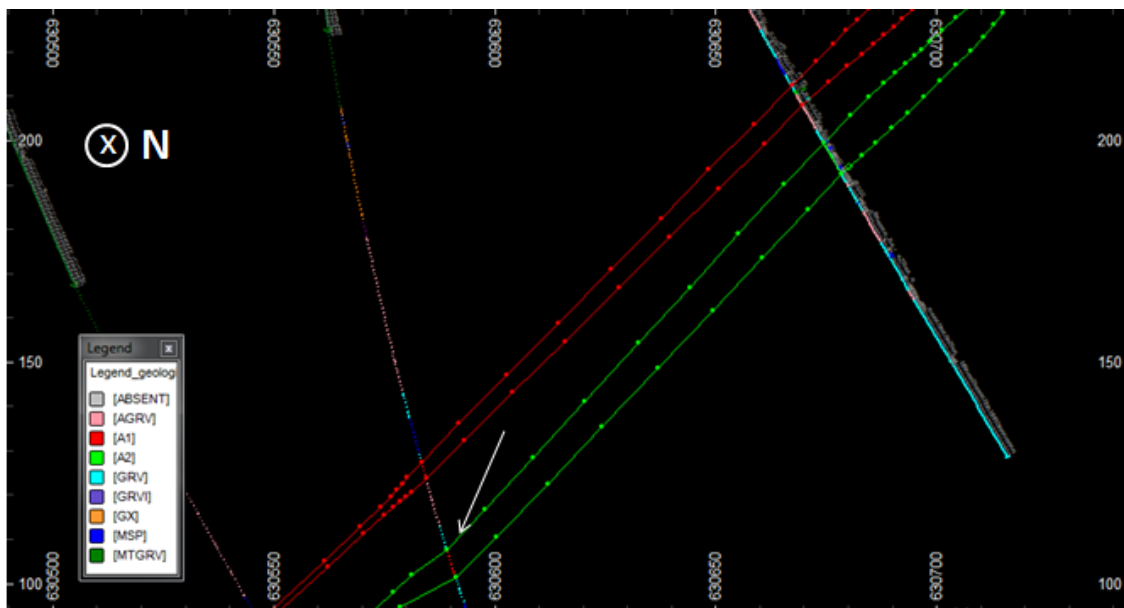


Figura 33 – Seção em que as informações geológicas dos furos são diferentes da continuidade do nível mineralizado A2, indicado pela seta branca.

8. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A validação do banco de dados identificou diversos problemas que atrapalham a modelagem geológica. Uma das principais inconsistências encontradas foi a ausência de desvio (*survey*) em alguns furos, pois o programa Datamine Studio 3[®] reconhece a ausência de desvio como sendo um furo vertical. Caso não tivessem sido filtrados na validação, ocorreria a interpretação errada das informações geológicas contidas nos furos. Os demais pontos de erro foram de digitação do banco de dados, ausência de análises químicas ou de descrições litológicas.

O desenvolvimento do modelo geológico tridimensional contribuiu com o aumento do conhecimento dos controles litológicos das rochas encaixantes da mineralização, pois se delimitou tanto a camada-guia (MSP) de separação das estruturas mineralizadas, como também a continuidade da mineralização em locais em que não houve o desenvolvimento das galerias da mina até o momento.

A envoltória de teores das estruturas mineralizadas A1 e A2 utilizou o modelo geológico como guia, uma vez que tais estruturas estão separadas por uma camada de MSP (metassedimentos pelíticos). Esta camada-guia determina se os teores que estavam sendo modelados pertenciam à estrutura A1, acima da camada de MSP, ou A2, abaixo da mesma.

O mapeamento permitiu reconhecer feições diferentes daquelas presentes na revisão bibliográfica, pois nas galerias foi observado o acúmulo de sulfetos nos *necks* dos

boudins presentes na rocha encaixante. Este acúmulo pode ser o responsável pela presença de altos teores de ouro em regiões pontuais ao longo do depósito, pois a concentração deste elemento está diretamente associada à sulfetação das rochas do depósito.

A análise estatística possibilitou a observação da distribuição de frequências na forma de histogramas da variável ouro dentro de cada estrutura mineralizada do depósito e a comparação da distribuição dos teores após a regularização das amostras. Além disto, através da assimetria positiva observada nos histogramas foi possível confirmar a consistência dos dados segundo o elemento em estudo.

A análise geoestatística iniciou-se com a análise exploratória dos dados com a finalidade de se obter a anisotropia do fenômeno espacial em estudo. Para isto, foi realizado o cálculo do variograma experimental para quatro direções (0° , 45° , 90° e 135°) no plano horizontal e uma direção ortogonal, não coplanar. Entretanto, a análise exploratória dos dados não foi satisfatória e eficaz na definição da anisotropia.

A partir das informações do mapeamento realizado nas galerias da mina, foram calculados variogramas experimentais nas direções regulares do plano da mineralização, porém, o resultado não foi plenamente satisfatório. Portanto, decidiu-se calcular um variograma omnidirecional para o plano da mineralização, que apresenta direção N310 com mergulho de 50° para SW e outro variograma para um plano ortogonal ao de referência com direção N220. Como a escala de amostragem na vertical é diferente daquela para o plano de referência, foi possível reconhecer anisotropia mista entre os variogramas experimentais. Os variogramas apresentam-se pouco estruturados e refletem a distribuição irregular da amostragem ao longo das estruturas mineralizadas e também a complexidade do depósito.

Os modelos teóricos de variograma foram ajustados para as direções citadas e demonstraram valores baixos de amplitude, além de anisotropias mistas.

Através da validação cruzada foram determinados os parâmetros de vizinhança a serem utilizados na estimativa por krigagem ordinária. De início, foram utilizadas as amplitudes dos modelos teóricos de variograma como os eixos do elipsoide de busca (U, V e W) e uma vizinhança restritiva. Entretanto, o número de amostras estimadas foi muito baixo e decidiu-se aumentar o alcance de busca dos eixos do elipsoide para uma distância equivalente ao dobro das amplitudes e utilizar parâmetros de vizinhança menos restritivos. Esta mudança aumentou o número das amostras a serem estimadas e também aumentou o coeficiente de correlação dos dados, o que justifica a aplicação de tais parâmetros.

Os modelos de blocos utilizados foram rotacionados segundo o plano de referência da mineralização e cortados dentro dos sólidos das estruturas mineralizadas A1 e A2. A krigagem ordinária de blocos aplicou os modelos teóricos de variograma e os parâmetros de vizinhança na estimativa do modelo.

Após esta etapa notou-se que há um grande número de blocos não estimados no modelo e mesmo utilizando o alcance dos eixos do elipsoide de busca como o dobro da distância das amplitudes, não foi possível estimar todos os blocos, pois devido à escassez de informações em partes dos níveis mineralizados, fazendo com que a vizinhança definida não fosse plenamente satisfeita.

Por fim, o teor médio de Au (g/t) e o volume total de minério foram calculados a partir do modelo de blocos final das estruturas mineralizadas A1 e A2. Na Tabela 11 apresenta-se o recurso total de ouro presente no depósito de Caiamar. Os cálculos foram realizados utilizando a densidade média de 2,7 g/cm³ para o minério.

Tabela 11 – Recursos totais e teores.

Estrutura Mineralizada	Volume Total (t)	Teor médio de Au (g/t)	Total de Au (t)	Densidade do minério (g/cm3)
A1	2471572,62	2,8415	7,0229736	2,7
A2	2119065,73	1,5264	3,2336943	2,7
A1 + A2	4590638,35	-	10,2566679	2,7

Após o cálculo das estimativas e volumes no depósito de Caiamar é possível verificar que a estrutura mineralizada A1 apresenta maior volume e teor médio do que o minério da estrutura mineralizada A2. As visitas feitas às galerias da mina, durante as etapas de mapeamento, confirmam estes resultados, pois foi possível observar que o corpo A1 apresenta maior sulfetação e continuidade do minério.

9. CONCLUSÕES

A modelagem geológica tridimensional associada a estudos geoestatísticos criteriosos permite a avaliação consistente de depósitos minerais. Ao longo do trabalho, ficou clara a importância de cada etapa realizada, que juntas permitiram a interpretação geológica confiável do depósito estudado.

As atividades de campo contribuíram com o conhecimento das relações de contato entre as unidades litológicas presentes no depósito e permitiram definir como era a geometria das estruturas mineralizadas A1 e A2.

A validação dos dados foi essencial no trabalho realizado, pois a partir da mesma foi possível eliminar erros presentes no banco de dados que comprometeriam as interpretações geológicas e afetariam todas as etapas realizadas no trabalho de formatura.

A elaboração do modelo geológico tridimensional do depósito foi a etapa mais importante deste trabalho, pois a partir deste modelo geológico foram baseadas todas as interpretações do comportamento das estruturas mineralizadas para auxiliarem nas etapas de análise geoestatística e estimativa de teores.

A modelagem da envoltória de teores utilizou o modelo geológico tridimensional, mapeamento das galerias da mina e análises químicas de ouro como base para determinação das espessuras e continuidade de cada estrutura mineralizada (A1 e A2) dentro do depósito de Caiamar.

A análise estatística teve como resultado a distribuição dos teores dentro de cada estrutura mineralizada e do estéril. Na análise geoestatística utilizou-se a interpretação geológica dos corpos mineralizados e calcularam-se os variogramas experimentais ao longo de um plano de referência igual a N310°/50°SW e no plano ortogonal a este. Embora o variograma experimental tenha se apresentado pouco estruturado estas direções de cálculo foram as com melhores resultados. Acredita-se que esta pouca estruturação dos variogramas seja fruto da amostragem que pode ser considerada escassa para representar o fenômeno espacial estudado.

Justamente por causa da escassez dos dados, a vizinhança para a estimativa na validação cruzada precisou ter critérios de busca menos restritivos para que assim mais pontos pudessem ser estimados tanto na validação cruzada, quanto na estimativa propriamente dita.

10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barnes, M. P. 1980. *Computer assisted mineral appraisal and feasibility*. New York, Soc. Min. Eng. 167p.
- Bubeniceck, L. & Haas, A. 1969. *Method of Calculation of the Iron Ore Reserves in the Lorraine Deposit*. In: *The Decade of Digital Computing in the Mineral Industry*. The American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, Inc. Nova Iorque, p. 179-210.
- Danni J.C.M. & Ribeiro C.C. 1978. Caracterização estratigráfica da sequência vulcano-sedimentar de Pilar de Goiás e de Guarinos, Goiás. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 30. Recife, 1978. Anais. vol. 2, p. 252-269.
- Handley, G. A., Lewis, R. W., Wilson, I. 1987. *The Collection and Management of Ore Reserve Estimation Data*. In: *Resources and Reserves Symposium*, Sydney. The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, p. 27 – 30.
- Houlding, S. W. 1994. *3D Geoscience Modeling Computer Techniques for Geological Characterization*. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, 309p.
- Jost H. & Oliveira, A.M. 1991. *Stratigraphy of the greenstone belts, Crixás region, Goiás, central Brazil*. Jour. South Am. Earth Science, 4:201-214.
- Jost H., Rodrigues V.G., Carvalho M.J., Costa R.T.C. 2011. Redefinição estratigráfica do greenstone belt de Guarinos, Goiás. *Geologia USP, Sér. Científica*, 12: 31-48.
- Journel, A. G. & Huijbregts, C. J. *Mining Geostatistics*. London, Academic Press, 1978, 600 p.
- Koch Jr., G. S. & Link, R. F. 1971. *Statistical Analysis of Geological Data*, New York. Dover Publications, v. 1, 375p.
- Pimentel M. M., Jost H., Fuck R. A., Armstrong R. A., Dantas E. L., Potrel A. 2003. *Neoproterozoic anatexis of 2.9 Ga old granitoids in the Goiás-Crixás block, Central Brazil: evidence from new SHRIMP U-Pb data and Sm-Nd isotopes*. *Geologia USP, Sér. Científica*, 3:1-12.
- Rodrigues, V. G. 2011. *Geologia do Depósito Aurífero do Caiamar, Greenstone Belt de Guarinos: Um Raro Depósito Associado à Epissienito Sódico*. Universidade de Brasília, DF. Dissertação de Mestrado, 79 p.

Valeriano, C. M., Dardenne, M. A., Fonseca, M. A., Simões, L. S. A. & Seer, H. J. 2004. A Evolução tectônica da Faixa Brasília. In Capítulo XXXII - Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. p 576 - 592.

Yamamoto, J. K. 2001. Métodos Computacionais *In*: Yamamoto, J. K. (org.). Avaliação e Classificação de Reservas Minerais. São Paulo, Edusp. p 124 - 161.

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

Yamamoto, J. K. & Landim, P. M. B. 2013. Geoestatística: conceitos e aplicações. São Paulo, Oficina de textos. P 69 – 83.

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.