

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**PROPOSTA E AVALIAÇÃO DE NOVO PROTOCOLO DE AMOSTRAGEM  
PARA UM DEPÓSITO DE OURO LIVRE**

Carolina Nogueira Mafra

Orientador: Marcelo Monteiro da Rocha

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA  
(TF-2016 / 07)

SÃO PAULO

2016

TF  
M187  
CN.p

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS



**PROPOSTA E AVALIAÇÃO DE NOVO PROTOCOLO DE AMOSTRAGEM PARA UM  
DEPÓSITO DE OURO LIVRE**

*Carolina Mafra*

---

Carolina Nogueira Mafra

*[Handwritten Signature]*

---

Marcelo Monteiro da Rocha

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA  
(TF-2016 / 07)

IGc-Instituto de Geociências



Proposta e avaliação de novo protocolo de amostragem  
para um depósito de ouro livre.

M27126

SÃO PAULO

2016

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus pelas inúmeras oportunidades e pela conclusão de mais esta etapa.

Aos meus pais (Sérgio e Renata) por sempre acreditarem em mim e me apoiarem em todos os momentos, sem vocês eu não seria nada. Ao meu irmão por me ensinar a conviver, dividir e respeitar.

A todos os meus familiares, avós e avôs, tios e tias, em especial a tia Susu por ter me acolhido por 4 anos e ter sido uma conselheira especial.

My second family, for all the love and memories, time and distance will never grow us apart.

Aos amigos que a vida me deu. Pessoas que passaram ao decorrer do caminho e que deixaram sua marca. Amigos de Paraíso, Ribeirão, Viçosa, OP e SP. Algumas pessoas que não estão mais tão frequentes na minha vida mas que guardo no coração com carinho eterno.

Ao Mário por me mostrar que coincidências não ocorrem por acaso, não tenho palavras para agradecer toda a ajuda.

Ao meu gestor Fernando Villanova pela oportunidade de aprendizado e de conhecer um pouco sobre amostragem, a Isabela e ao Henrique que contribuíram muito para este trabalho, ao Weder e ao Paulo pela oportunidade do primeiro estágio.

Ao meu orientador Prof. Marcelo Rocha por todo o aprendizado e orientação. A todos os professores pelos conhecimentos e paciência, em especial aos professores Caetano Juliani e Lena Monteiro que marcaram minha trajetória universitária.

Ao Newton Cunha pela oportunidade de conhecer a geologia e mineração.

## SUMÁRIO

RESUMO.....	1
ABSTRACT.....	2
1. INTRODUÇÃO.....	3
2. METAS E OBJETIVOS.....	4
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
3.1 Geologia do depósito.....	5
3.2 Teste de heterogeneidade.....	5
3.3 Avaliação de recursos minerais.....	6
3.4 Amostragem.....	6
3.4.1 <i>Protocolo atual de amostragem</i> .....	8
3.4.2 <i>Protocolo de amostragem proposto</i> .....	10
3.5 Análise estatística.....	11
3.6 Análise geoestatística.....	13
3.7 Validação cruzada.....	14
3.8 Krigagem ordinária.....	15
3.9 Modelo geológico tridimensional.....	16
3.10 Efeito do volume variância.....	17
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	18
5. RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÕES.....	21
5.1 Teste de heterogeneidade.....	21
5.2 Análise dos protocolos.....	22
5.3 Otimização do protocolo.....	23
5.4 Análise de teores.....	24
5.5 Análise estatística.....	25
5.6 Modelo geológico 3D.....	28
5.7 Modelo de blocos .....	29
5.8 Krigagem ordinária.....	29
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	31
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	33

## RESUMO

A variabilidade intrínseca do depósito estudado é elevada e está principalmente associada à presença de ouro livre em veio de quartzo. O baixo teor, a elevada heterogeneidade, a presença de pepitas de ouro e a diferença de densidade entre as rochas mineralizadas e estéreis fazem com que a amostragem desse tipo de depósito seja complexa. Logo, existe a necessidade da criação de protocolos de amostragem adequados que sigam as boas práticas da indústria mineira. Além disso, é de extrema importância a execução rigorosa de tais protocolos.

Os erros associados à amostragem iniciam-se na etapa de coleta e são adicionados durante todas as etapas do processo até o teor ser informado. Dessa forma, é importante avaliar os erros gerados em cada etapa, de modo a definir o grau de confiabilidade das estimativas que serão realizadas em etapas subsequentes.

Visando a obtenção de amostras representativas e a redução do erro amostral do depósito estudado este trabalho propõe alterações do atual protocolo de amostragem. Para isto, amostras de testemunhos de sondagem de *metachert* (MCH) e Formação Ferrífera Bandada (BIF), que correspondem as rochas hospedeiras da mineralização, foram coletadas e analisadas seguindo tanto o protocolo atual quanto o novo protocolo proposto. De posse dos resultados das análises, dois bancos de dados foram construídos.

Análises estatísticas e geoestatísticas foram realizadas para cada um dos bancos de dados com o objetivo de inferir a distribuição dos teores de ouro em dois níveis da mina, assim como seu comportamento espacial. Por fim, um modelo geológico tridimensional foi construído, e o modelo de blocos estimado por krigagem ordinária, utilizando ambos os bancos de dados. As diferenças obtidas em cada uma das etapas da avaliação dos recursos foram estudadas e discutidas ao decorrer do trabalho.

## **ABSTRACT**

The intrinsic variability of this deposit is high and it is mainly associated to the occurrence of "free" gold. The low grade associated to the high heterogeneity, high proportion of gold nuggets and the significant difference of density for the mineralized and barren rocks, makes sampling a challenging task. Sampling heavily impacts the assessment of mineral reserves and downstream decisions that may involve huge capital commitments, and hence requiring the establishment of best practices that involves the determination of sampling protocols and assuring a correct execution.

Sampling errors start when data is collected and they are added in every step of the process until the final grade of a sample can be determined. Since errors cannot be completely eliminated from the process, they ought to be understood and measured in each step to allow the definition of levels of confidence to the resource estimates using such samples.

Aiming for representative samples and minimize sampling errors in this mine, this work propose modifications in the sampling protocol currently used in the mine. Several core samples from diamond drill holes from mineralized zones (MCH and BIF) were collected and analyzed following both the current and proposed protocols. Thus, two databases were built and validated in order to be compared.

Statistical and geostatistical studies were performed using both databases aiming the estimation of grade distributions for two different levels of the mine, their spatial variability and to allow a quantitative assessment of the differences obtained when using each of the sampling protocols. Finally, a 3D geological model was built and each of the databases were used to spatially interpolate the gold grades using ordinary kriging (KO). Both resource models were compared and the differences discussed.

## 1. INTRODUÇÃO

A aplicação de técnicas de amostragens e geoestatísticas adequadas é de extrema importância para a avaliação de recursos minerais.

Diversos fatores podem influenciar negativamente a avaliação de um depósito mineral, tais como a utilização de métodos de amostragem e malha de sondagem inapropriados, erros na obtenção dos dados geológicos, na interpretação do modelo geológico e na análise química das amostras. Além disso, a escolha adequada do método para a estimativa de teores também é de extrema importância para a avaliação de um depósito mineral (Bertossi, 2011).

A teoria da amostragem de Gy (TOS), utilizada para materiais fragmentados, foi criada na década de 50 e possibilita a determinação do erro fundamental de um depósito mineral, assim como a massa mínima necessária para tornar uma amostra representativa. A utilização de conceitos que envolvem a TOS é de extrema importância para garantir um determinado nível de precisão e acurácia durante a análise estatística e da variabilidade espacial dos teores, assim como da estimativa dos recursos (Bortoleto, 2015).

As etapas de coleta, cominuição e redução da massa amostrada devem ser criteriosas para que a representatividade seja garantida e os erros amostrais minimizados. Essa representatividade é influenciada tanto pelo método de análise utilizado, quanto pelo volume amostral. Problemas de contaminação assim como a própria mudança de suporte também influenciam na precisão do resultado final (Bertossi, 2011).

A variabilidade espacial é diferente para cada tipo de depósito ou mesmo em diferentes camadas/litotipos dentro de um mesmo depósito (Deutsch, 2002). A estimativa incorreta dos teores baseada em amostras pouco precisas e em técnicas inadequadas de amostragem implica na subestimativa ou superestimativa dos recursos minerais, podendo resultar em prejuízos econômicos (Bortoleto, 2015). Ainda assim, atualmente, o processo de amostragem é negligenciado por muitos empreendimentos mineiros.

O banco de dados de uma empresa de mineração pode ser composto por amostras coletadas a partir de diversos métodos, tais como canais e testemunhos de sondagem de diferentes diâmetros. Diferentes técnicas de amostragem podem resultar em amostras de características distintas, tais como diferentes suportes e erros amostrais. Estas diferenças influenciam diretamente nos resultados de etapas subsequentes. Dessa forma, a utilização de amostras provenientes de diferentes métodos amostrais durante as etapas de avaliação de um depósito mineral deve ser realizada com cautela. Um exemplo clássico das diferenças práticas na caracterização utilizando amostras de diferentes suportes é o efeito volume-variância, em que, de modo geral, quanto maior o suporte menor tende ser a variância medida (Janas, 2001).

Em minas onde o ouro encontra-se na forma livre, a imprecisão causada por uma amostragem ou suporte inadequado podem gerar inconsistências na estimativa dos recursos

minerais. Dessa forma, a implementação de um protocolo otimizado fundamentado em teorias sólidas de amostragem é de extrema importância. Nestes casos, é fundamental o conhecimento sobre o tamanho da maior partícula de ouro, da presença e o tamanho de possíveis *clusters* (agrupamentos de partículas), da segregação destas partículas (ou seja, se as maiores partículas de ouro estão associadas a outras menores ou a outros minerais) (Pitard e Stevens, 2011).

O protocolo atual da mina contemplada neste estudo de caso gera erros superiores aos sugeridos para minério de ouro. Com o intuito de se obter estimativas de teor com maior grau de confiabilidade, um novo protocolo de amostragem dos furos de sondagem foi proposto.

## 2. METAS E OBJETIVOS

A principal meta deste trabalho consiste em testar um novo protocolo de amostragem dos furos de sondagem diamantada da mina de ouro estudada, uma vez que o protocolo atual não é recomendado para este tipo de depósito. O principal objetivo destas alterações é aumentar a representatividade das amostras coletadas e a confiabilidade das estimativas. Para isto pretende-se comparar a avaliação dos recursos obtidos a partir do protocolo de amostragem atualmente utilizado e do novo protocolo proposto.

Para atingir estes objetivos foram estipuladas as seguintes metas:

- Descrever o procedimento atual de amostragem, o procedimento proposto e quantificar os erros associados a cada um.
- Analisar amostras de *metachert* (MCH) e Formação Bandada Ferrífera (BIF) seguindo o protocolo atual e o protocolo proposto.
- Determinar o erro fundamental associada à amostragem do depósito estudado a partir do teste de heterogeneidade e verificar a variância adicionada em cada etapa de amostragem.
- Modelamento geológico utilizando o *software Leapfrog Mining*<sup>®</sup>.
- Realizar a análise estatística e geoestatística dos dados e estimativa do modelo de blocos utilizando o programa *Datamine Studio 3*<sup>®</sup>.
- Comparar o recurso estimado por cada protocolo de amostragem e sugerir as mudanças necessárias.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Geologia do depósito

O depósito estudado é classificado como depósito de ouro em filão. Ele tem caráter epigenético, desenvolvido em um ambiente orogênico compressional.

A principal rocha hospedeira é o quartzo fumê/*metachert* (MCH), onde o ouro é encontrado na forma nativa ou como liga ouro e prata. A outra rocha hospedeira do depósito corresponde a uma formação ferrífera bandada (BIF), onde o ouro encontra-se incluso em sulfeto. A Tabela 1 descreve as rochas hospedeiras do depósito.

**Tabela 1:** Descrição das rochas hospedeira do depósito

Tipo litológico	Descrição
<i>Metachert</i> ou Quartzo fumê (MCH)	Rocha maciça, de cor escura, composta essencialmente de quartzo fumê e leitoso; carbonato e pirita são minerais acessórios.
Formação ferrífera bandada (BIF)	Rocha com bandas claras compostas predominantemente de quartzo, e bandas marrom a marrom escuro constituídas de ankerita, siderita e quartzo. Apresentam na fácies carbonato e sulfeto.

O depósito estudado é estruturalmente controlado, marcado numa dobra regional, produto da deformação progressiva que evoluiu para cavalgamento em um sistema de rampas e patamares.

A estrutura mineralizada é classificada como uma antiformal reclinada do tipo 2, segundo Ramsay (1966), com eixo com orientação NW-SE, zona de charneira espessada e flancos adelgaçados. O controle estrutural da mineralização é relacionado com estruturas tipo *pinch-and-swell* que se desenvolveram para *boudins*.

A mineralização foi formada a partir de fluidos metamórficos, aquo-carbônicos de baixa a moderada salinidade que se infiltraram na rocha hospedeira em diversas etapas.

A mineralização está associada à intensa alteração hidrotermal que inclui silicificação, carbonatação, sericitização, cloritização e sulfetação. O quartzo fumê é interpretado como produto de um intenso hidrotermalismo silicoso pervasivo, enquanto que a precipitação do minério na BIF está associada à silicificação e sulfetação desta litologia.

#### 3.2 Teste de heterogeneidade

O teste de heterogeneidade proposto por Pitard (1993) visa definir o fator  $IH_L$ , que corresponde à heterogeneidade dos fragmentos dentro de um lote, a um determinado grau de cominuição, e determinar a massa mínima para obter uma amostra representativa (Chierigati e Pitard, 2012).

A heterogeneidade constitucional (fator  $I_{HL}$ ) é responsável pelo erro fundamental, principalmente na amostragem de metais preciosos. Este fator é função do produto dos fatores granulometria ( $g$ ), forma ( $f$ ), diâmetro ( $d_{95}$ ), mineralogia ( $c$ ) e liberação ( $l$ ). Não é necessário estimar os fatores forma, granulometria, mineralogia e liberação individualmente uma vez que o produto deles é obtido experimentalmente (Koyama, 2009).

$$I_{HL} = c * l * f * g * d_{95}^3$$

O teste de heterogeneidade visa estimar experimentalmente o  $I_{HL}$  através da seleção de fragmentos, de forma aleatória, para diferentes frações granulométricas pré-definidas.

O resultado do teste é plotado em um gráfico bi-log, em que o eixo da abscissa é representado por  $\ln(d_n)$  e o eixo da ordenada por  $\ln(\sigma_{FSE}^2 * M_s)$ , em que  $M_s$  corresponde a massa média da amostra com determinado  $d_n$ . A partir deste gráfico estimam-se os valores das constantes  $K$  (estimativa do produto  $c*f*g*l$ ) e  $\alpha$  (inclinação da reta), calibradas para cada tipo de minério.

### 3.3 Avaliação de recursos minerais

Os trabalhos de pesquisa em depósitos minerais buscam o conhecimento da geologia, da geometria e do padrão de distribuição espacial de diferentes atributos geológicos, de modo a possibilitar o modelamento do mesmo de maneira qualitativa e quantitativa.

Uma das etapas principais na avaliação dos recursos e que deve ser reportada de maneira clara é a classificação dos recursos minerais. Esta classificação se baseia principalmente na avaliação das incertezas associadas ao conhecimento geológico e tecnológico à respeito do depósito, que estão diretamente relacionadas à quantidade e qualidade da informação adquirida durante as etapas de pesquisa mineral. Em depósitos que operam próximos ao teor de corte, a classificação dos recursos é ainda mais importante uma vez que a margem de erro tolerável nas estimativas é menor (Poniewierski, 2016).

O uso inadequado de métodos de amostragem, erros na definição da malha de sondagem, na obtenção dos dados geológicos, na análise química das amostras, o enviesamento da interpretação do modelo geológico e a escolha de um método inapropriado para a estimativa de teores de um depósito mineral são fontes de erros que podem comprometer a avaliação de um depósito mineral (Bertossi, 2011).

### 3.4 Amostragem

Na mineração a amostragem é importante para a quantificação e definição de viabilidade econômica, para o controle de processos e para a inspeção e classificação de lotes de produtos finais (Yamamoto, 2002; Freitas, 2014).

Ela é realizada devido à impossibilidade de avaliar integralmente a população, seu principal objetivo é definir o depósito em três dimensões a partir da análise dos parâmetros de interesse e da distribuição espacial dos teores de minério (Yamamoto e Rocha, 2001).

De acordo com a Teoria da Amostragem (Barnes, 1980), se um número representativo de dados for coletado, sem enviesamento, em uma população seu valor médio se aproxima da média da população.

Para que a representatividade amostral exista é necessário que haja a combinação de acurácia e reprodutibilidade (Figura 1), em que a acurácia pode ser entendida como sendo a minimização do erro sistemático da amostragem, ou seja, ela reflete a proximidade entre o valor médio das amostras e a média real do lote (Chierigati e Pitard 2012). A precisão, por sua vez, é a medida da dispersão dos resultados obtidos para um mesmo lote, ou seja, ela mede a variância dos resultados (Mwasinga, 2000).



Figura 1: Conceito de acurácia e precisão (Minnitt, 2007).

A amostragem é dividida em duas etapas: a amostragem primária que corresponde a escolha e retirada da porção que representará a população; e a amostragem secundária, responsável pela redução granulométrica, homogeneização e quarteamento da amostra primária até que a massa seja suficiente para análise.

As estimativas envolvem erros que podem ser atribuídos à variabilidade natural do depósito, que corresponde ao erro fundamental, e erros associados à amostragem. Estes erros podem estar relacionados ao processo de seleção da amostra primária, à heterogeneidade do material, às etapas de amostragem secundária e aos instrumentos de análise. Desta forma, é essencial que os métodos de amostragem sejam precisamente definidos e descritos. De modo geral, é possível controlar e minimizar os erros associados à etapa de amostragem secundária e análise das amostras, no entanto não é possível eliminar o erro fundamental, que é uma propriedade intrínseca ao material estudado. Por este motivo, é essencial que a amostra possua tamanho suficiente para que se tenha o grau de confiança adequado frente ao erro fundamental (Bergerman, 2009). Quanto mais

simétrica a população menor o tamanho da amostra primária necessária para representá-la (Minnitt, 2007).

Segundo Minnitt (2007), o tamanho ideal da amostra primária pode ser definido pelo teste de heterogeneidade. A teoria desenvolvida por Pierre Gy, para materiais fragmentados, correlaciona a variância associada ao erro fundamental com o cubo do diâmetro nominal dos fragmentos e ao inverso da massa da amostra (Góes *et al.*, 2004).

A variabilidade pode ser subdividida em fatores de pequena e grande escala. Os componentes de pequena escala são relativos à constituição e a heterogeneidade do depósito e estão relacionados ao erro fundamental, ao efeito pepita e aos erros de agrupamento de amostras, enquanto os fatores de grande escala envolvem *trends* e estruturas locais e regionais, concentração de minério, especificações da *commodity* e características metalúrgicas (Minnitt, 2007). Em caso de ouro livre, as partículas mais grossas possuem grande impacto no erro fundamental (Pitard e Steven, 2011).

Os protocolos de amostragem partem do pressuposto da equiprobabilidade entre as amostras e eles são definidos com base no que se deseja amostrar, na precisão requerida e no conhecimento prévio sobre o depósito. O melhor protocolo é aquele que otimiza o processo de definição, retirada, preparação e análises das amostras introduzindo o menor viés ao processo (Minnitt, 2007). Um protocolo otimizado permite que o desvio padrão relativo ao erro fundamental (FSE) e o erro de segregação e agrupamento (GSE) seja minimizado (Bortoleto, 2015).

Um protocolo de amostragem inadequado pode adicionar uma variância aleatória no sistema, podendo levar à decisões incorretas e prejuízos econômicos (Minnitt, 2007). Em um estudo de caso, Pitard e Stevens (2011) compararam os teores obtidos por 30 g *Fire Assay* com 1,5 kg analisados por lixiviação com cianeto em uma mina de ouro no México, onde o teor médio esperado era 1,2 g/t e partículas de ouro de 700 micras eram encontradas. Neste estudo, os resultados da análise por lixiviação resultaram em 50% mais ouro para teores próximos ao *teor de corte*, comprovando-se assim o grande erro na classificação entre minério e estéril e grande perda econômica devido a utilização de um protocolo inadequado de amostragem.

No caso de depósitos com ouro livre é importante considerar o tamanho máximo das partículas de ouro, a presença de agrupamentos, o tamanho e a distribuição desses agrupamentos, se há enriquecimento em ouro em um contato geológico e a associação desse ouro com outros minerais (Pitard e Stevens, 2011).

#### 3.4.1 Protocolo atual de amostragem

O protocolo de preparação e análise de amostras utilizado atualmente na mina estudada neste trabalho segue recomendações internas que envolvem as etapas de

amostragem primária, cominuição (britagem e pulverização), quarteamento e análise por ensaios de *fire assay* (Figura 2).

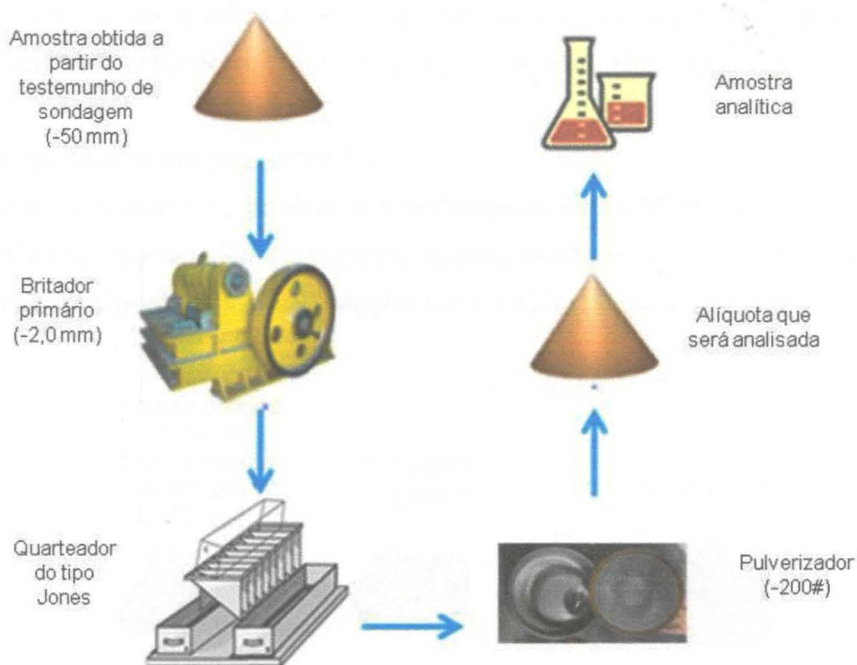


Figura 2: Esquema do protocolo de amostragem atual

A amostra primária é obtida a partir do testemunho de sondagem diamantada rotativa (DDH), em que são delimitadas e coletadas, nas zonas mineralizadas, amostras de aproximadamente 80 cm.

No protocolo atual, aproximadamente 2,5 kg de amostra de testemunho, representando os 80 cm, são enviados para o laboratório de análises químicas para amostragem secundária. Para cominuir a amostra ela passa por um britador de mandíbulas que reduz a granulação para 80% menor que 2,0 mm. Após britada, a amostra é dividida em um quarteador do tipo *Jones* com aberturas de 2,0 cm, em que são separadas alíquota de 500 g. Essa massa é então pulverizada por 3 minutos em um moinho de panelas na granulação  $75 \mu_{P80}$ . Depois de pulverizada, a amostra é homogeneizada utilizando a técnica de homogeneização em lona. Utilizando 3 a 6 incrementos, um total de 30 g são coletadas com uma espátula para serem analisadas pelo método *fire assay*.

O método de análise por *fire assay* consiste na determinação quantitativa do metal de interesse. A amostra pulverizada é homogeneizada com litargírio (PbO), fundente, quartzo e solução de  $AgNO_3$  e fundida em um cadinho. Após resfriada, são formadas duas fases sólidas, uma delas formada por chumbo (Pb), ouro (Au), prata (Ag) e elementos do grupo da platina (Pt) e a outra formada por escória de quartzo. A liga de Pb, Au, Ag e elementos do grupo da platina é levada novamente ao forno, em temperatura suficiente para oxidar o chumbo e formar uma amálgama de prata (Rao, 2000; Barefoot, 1999; Hall, 1990

apud Magalhães 2008). Essa amálgama de prata é transferida para um tubo de ensaio e dissolvida por ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) e ácido clorídrico ( $\text{HCl}$ ), o tubo é levado para aquecimento em bloco digestor para a dissolução completa da pérola de prata. A solução obtida pela digestão ácida é utilizada para a determinação do Au por espectrometria de adsorção atômica (ICP-AAS) (Rao, 2000; Barefoot, 1999; Hall, 1990 apud Magalhães 2008).

### 3.4.2 Protocolo de amostragem proposto

O protocolo proposto para análise das amostras de BIF e MCH envolve as etapas de amostragem primária, cominuição (britagem), quartejamento e análise por lixiviação com cianeto e *fire assay* do resíduo dessa lixiviação para o MCH (Figura 3) e por *fire assay* para a BIF.

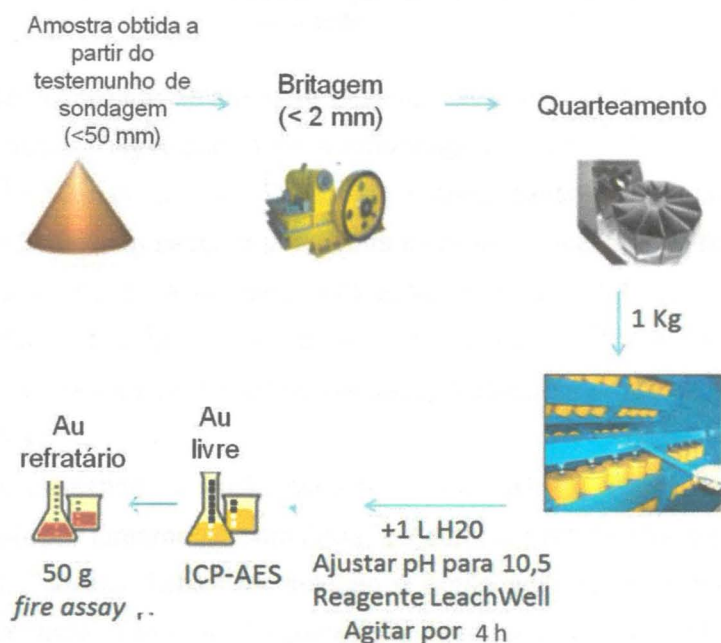
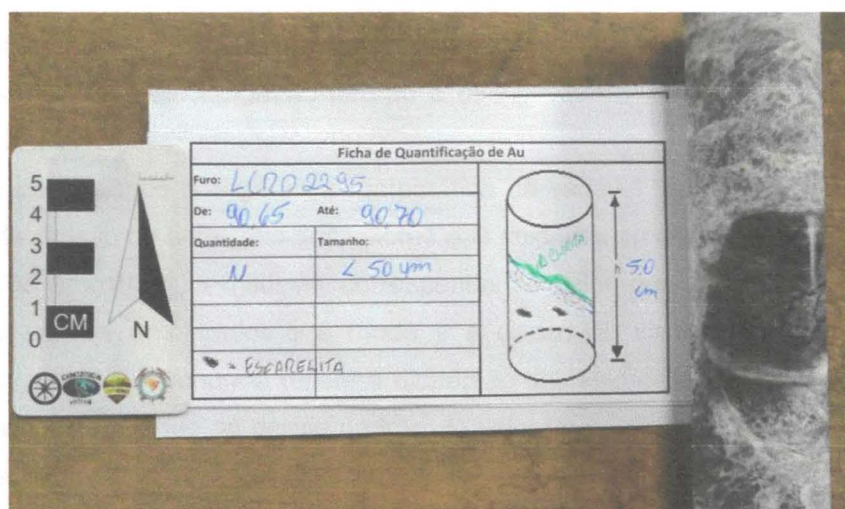


Figura 3: Esquema do protocolo de amostragem proposto

A presença de ouro livre aumenta a variabilidade das amostras de MCH. A partir da observação de teores anômalos, que poderiam ser identificados como *outliers*, foi inserida na rotina de descrição de testemunho a quantificação do ouro livre visível, seu tamanho e *cluster* (Figura 4).



**Figura 4:** Ficha de quantificação de ouro, que foi introduzida recentemente na rotina de descrição.

Sabendo-se da dificuldade de amostrar esse tipo de mineralização, para as amostras de MCH, o novo protocolo propõe que, após a amostragem primária, 2 kg de amostra seja enviada para o laboratório de análise. Toda esta massa deverá ser britada à 95% da amostra passante em 2 mm. Em seguida, a amostra deve ser reduzida em alíquotas de 1 kg em quateador do tipo *Jones*. Esta amostra será pulverizada em 106  $\mu\text{P}_{90}$  e toda ela será analisada por lixiviação acelerada por cianeto usando LeachWELL™ e os resíduos sólidos desta lixiviação serão analisados pelo método *fire assay* tradicional para obter o teor de ouro associados aos sulfetos.

Para a análise utilizando lixiviação acelerada, a amostra é colocada dentro de um equipamento de cianetação juntamente com água, substância para manter o pH alcalino e o reagente LeachWELL™ Assay Tabs™. A solução é então agitada por rotação durante 4 horas, a amostra é extraída, o teor de Au cianetável determinado, e o resíduo é analisado por *fire assay*.

O novo protocolo propõe a manutenção do método *fire assay* para as amostras de BIF devido à baixa quantidade de ouro cianetável. No entanto, para esta litologia, o novo protocolo sugere o aumento da massa amostrada de 30 g para 50 g. Após quarteada, 1 kg da amostra será pulverizada de modo que 90% seja passante em 0,106 mm. O saquinho contendo essa amostra será colocado na horizontal, para que com uma espátula com 0,5 cm de largura e 15 cm de comprimento, introduzida até o fundo do saquinho, sejam retirados no mínimo 12 incrementos, totalizando uma alíquota de 50g para análise química.

### 3.5 Análise estatística

De modo geral, a análise estatística dos dados amostrais visa compreender melhor a variável aleatória estudada e inferir parâmetros descritivos sobre a população. Uma boa maneira de se sumarizar a informação é através do cálculo de estatísticas descritivas, que

podem ser subdivididas em: medidas de tendência central (média, mediana e moda); medidas de dispersão (variância, desvio padrão e coeficiente de variação) e medidas de forma (assimetria e curtose) (Yamamoto, 2002).

A média corresponde à esperança matemática da variável aleatória e é estimada pelo resultado da divisão do somatório dos valores das unidades amostrais pela quantidade total de unidades amostrais; a mediana corresponde ao valor que divide igualmente a distribuição dos valores amostrados e a moda é a classe de valores mais frequentes (Yamamoto *et al.*, 2001). A variância reflete a dispersão dos valores em torno da média e sua raiz quadrada corresponde ao desvio padrão. O valor do coeficiente de variação (CV) expressa a dispersão relativa em torno da média, permitindo classificar os depósitos minerais segundo a sua variabilidade relativa (Yamamoto *et al.*, 2001).

O CV pode ser utilizado como um guia para estabelecer o número de amostras necessárias para obter a precisão requerida em um depósito não amostrado e para definir o tipo de distribuição do banco de dados. O CV também é utilizado para controlar a qualidade da amostragem, pois como ele é um valor relativo, quando o CV encontrado é muito superior aos limites estabelecidos esta variabilidade adicional provavelmente foi introduzida durante o processo de amostragem (Koch e Link, 1971).

A grandeza do CV é função da variabilidade intrínseca do depósito. Elementos traços e metais preciosos possuem coeficientes de variação extremamente elevados, superiores a 2, enquanto elementos que estão presentes em maiores proporções possuem CV baixos, inferiores a 0,5 (Koch e Link, 1971).

A estatística descritiva chama de assimetria (ou *skewness*) o grau de simetria de uma distribuição de frequência. Uma distribuição pode ser assimétrica negativa (cauda da distribuição para esquerda), positiva (cauda da distribuição para direita) ou simétrica (Figura 5).

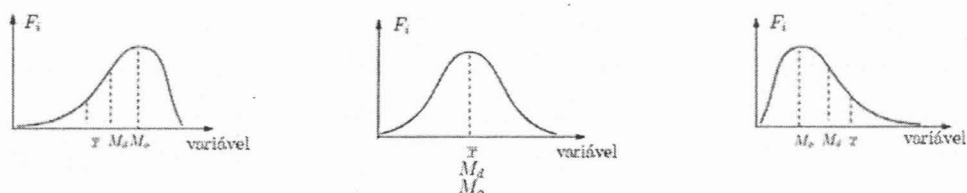


Figura 5: Curvas de distribuição de frequência. (a) simétrica, (b) assimétrica negativa, (c) assimétrica positiva

Outro parâmetro estatístico comum é a curtose que mede o grau de achatamento de distribuição e reflete a dispersão dos valores.

Uma das principais funções do cálculo e análise de estatísticas descritivas é a identificação de *outliers*, que são valores anômalos presentes no banco de dados. Esses valores podem apontar anormalidades do conjunto de dados ou erros introduzidos no processo de medição realizada (Yamamoto, 2002).

### 3.6 Análise geoestatística

O conceito de geoestatística surgiu a partir da década de 50 para complementar a estatística clássica uma vez que esta não é suficiente para explicar fenômenos que possuem variabilidade espacial e nestes casos deve-se levar em consideração a localização das amostras e a distância entre elas (Matheron, 1971 *apud* Yamamoto, 2002).

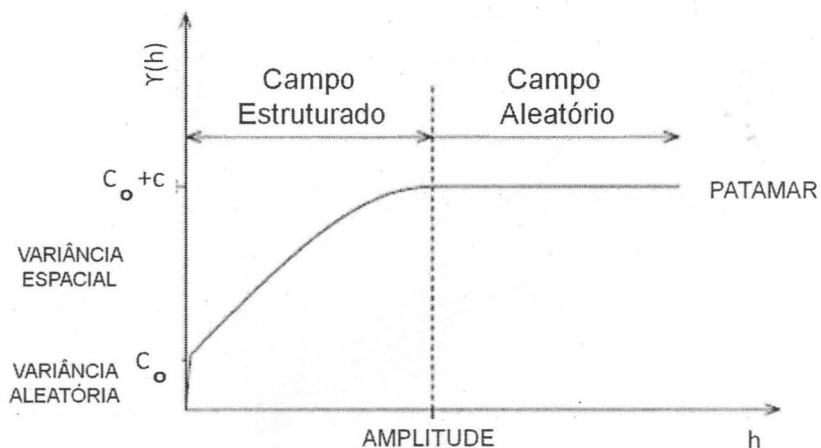
A geoestatística é utilizada no estudo das variáveis regionalizadas (V.R.), ou seja, variáveis com condicionamento espacial (Landim, 2003). Essas variáveis possuem localização geográfica, suporte (área/volume), continuidade (variância espacial) e anisotropia (comportamento diferente em diferentes direções) (Yamamoto, 2001).

Segundo Yamamoto (2001), a Hipótese Intrínseca implica em uma função que descreve o comportamento da V.R. no espaço. Essa função assume a estacionariedade espacial da média, da variância e das funções que descrevem a variabilidade espacial, ou seja, assume-se que a distribuição das diferenças entre dois pontos amostrais depende apenas da distância entre os pontos e da direção da análise e não da localização geográfica. O variograma é a ferramenta básica que mede a continuidade espacial de uma variável regionalizada, permitindo descrever quantitativamente a variabilidade espacial de um fenômeno regionalizado.

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

Onde  $\gamma(h)$  é semi-variância espacial em função do vetor  $h$ ;  $n$  é o número de pares de pontos separados pela distância  $h$ ;  $Z(x_i)$  é o valor da variável regionalizada no ponto de coordenadas  $(X_i, Y_i, Z_i)$  e  $Z(x_i+h)$  é o valor da variável regionalizada no ponto de coordenadas  $(X_i, Y_i, Z_i)$  adicionado do vetor  $h$ .

Com o incremento da distância entre os pares amostrais a variabilidade espacial tende a aumentar até que estes pontos percam a correlação espacial e o variograma estabilize no patamar. Em um variograma típico (Figura 6) é possível identificar características como amplitude (distância máxima em que há dependência espacial entre amostras), patamar (valor máximo do variograma) e o efeito pepita (descontinuidade próxima a origem).



**Figura 6:** Variograma com patamar típico (Yamamoto, 2001).

A variância aleatória (efeito pepita) de um fenômeno reflete a incerteza em pequenas distâncias, ou seja, quanto maior o efeito pepita, maior sua variabilidade e conseqüentemente maior a dificuldade da representatividade amostral. Essa variância possui um componente geológico e outro correspondente à amostragem (Dominy, 2007 *apud* Bortoleto, 2015).

O produto final da análise geoestatística é o modelo teórico de variograma, que corresponde a uma função matemática conhecida que é ajustada ao variograma experimental para descrever continuamente a variabilidade entre os pares de pontos (Yamamoto, 2001).

### 3.7 Validação cruzada

Esta etapa permite avaliar o ajuste do modelo teórico de variograma e definir parâmetros de vizinhança utilizados na estimativa. Ela consiste em estimar um ponto amostrado eliminando temporariamente seu valor amostral da base de dados e comparando a estimativa com a realidade. A partir da construção de um diagrama de dispersão dos valores estimados em função dos valores reais, espera-se que a nuvem de pontos esteja alinhada próxima à reta bissetriz de correlação máxima, ou seja, igual a 1 (Yamamoto, 2001). A dispersão em torno do esperado permite inferir se a estimativa superestimou ou subestimou os valores e a possível presença de viés condicional (Figura 7).

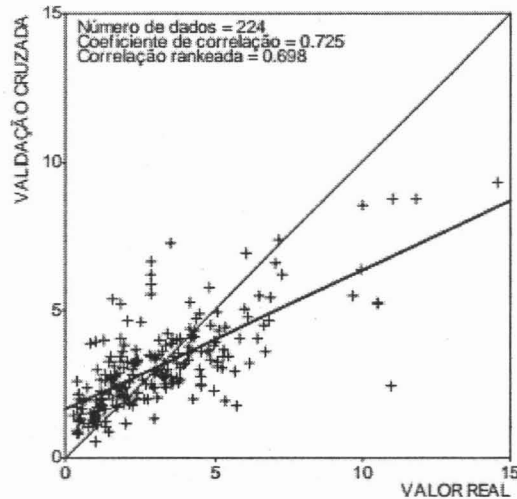


Figura 7: Resultado típico de uma validação cruzada (Yamamoto, 2002)

### 3.8 Krigagem ordinária

A krigagem ordinária (KO) é uma técnica local de estimativa e corresponde a uma interpolação linear de um ponto não amostrado a partir de uma combinação linear de pontos amostrados em sua vizinhança (Yamamoto e Landim, 2013). Além de minimizar o erro da estimativa, a krigagem leva em consideração o variograma (uma maneira de quantificar a variabilidade espacial do depósito), as dimensões dos blocos e a geometria dos dados da vizinhança (Vann *et. al.*, 2000). Por fim, assim como outros interpoladores lineares, a krigagem ordinária garante a condição de não enviesamento (especificamente para KO essa condição é garantida fazendo-se que a soma dos ponderadores se iguale a um).

O valor estimado da variável é definido através dos ponderadores encontrados a partir da solução do sistema de equações de krigagem ordinária (Yamamoto e Landim, 2013):

$$\left\{ \begin{array}{l} Z_{KO}^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \\ \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \end{array} \right.$$

Onde  $Z_{KO}^*(x_0)$  é o estimador da krigagem ordinária e  $\lambda_i$  são os pesos das amostras definidos a partir da solução do sistema de krigagem, , que pode ser sumarizado em sua forma matricial como:

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

As amostras utilizadas para estimar um ponto são definidas pela vizinhança local utilizada que deve ser escolhida de modo que ocorra uma boa distribuição espacial dos dados (Yamamoto, 2001). Isto implica em considerar a anisotropia espacial do depósito e em estudar o número ideal de amostras necessário para se obter uma estimativa local adequada.

Assim como outros interpoladores lineares, a krigagem ordinária tende a produzir estimativas suavizadas em relação à realidade; ou seja, ao se estimar o bloco através de uma combinação linear dos valores de pontos amostrais os valores mais altos são subestimados e os valores mais baixos superestimados, diminuindo a variabilidade do resultado em relação à variabilidade amostral (Bertossi, 2011).

Segundo Vann *et. al.*, (2000) em depósitos com distribuição fortemente assimétrica a estimativa da média por um estimador linear não é apropriada, pois a presença de *outliers* torna a estimativa enviesada.

### 3.9 Modelo geológico tridimensional

A modelagem geológica tridimensional tem como objetivo criar domínios homogêneos e representar a geometria do depósito mineral estudado a partir da amostragem, das informações litológicas e de modelos geológicos conhecidos.

Os estudos de modelagem de jazidas minerais, atualmente, são baseados na apresentação e interpretação dos dados ao longo de seções (2D) construídas com o uso das informações obtidas a partir de dados de sondagens (Houlding, 1994). A orientação das seções no espaço é definida pelo conhecimento geológico da região estudada e a partir delas são traçadas, para cada litotipo, poligonais representadas por linhas denominadas *strings*. O processo é repetido para todas as seções, em seguida os limites litológicos de cada perfil são interligados.

O programa Datamine Studio 3<sup>®</sup> interliga os perfis por meio de algoritmos baseados na triangulação de Delaunay, formando uma rede de triangulação (TIN) no perímetro do litotipo (Houlding, 1994). Os sólidos gerados por esse processo são chamados de *wireframes* que representam apenas a superfície do corpo mineral e não são capazes de armazenar a variação dos atributos espaciais.

O programa *Leapfrog Mining*<sup>®</sup>, introduzido pela primeira vez em 2004, utiliza um método de modelagem implícita capaz de gerar superfícies a partir de um conjunto de informações espaciais descritas por uma função de base radial, ou seja, dependente apenas da distância da origem (Gouveia *et. al.*, 2015).

Após a construção da *wireframe* é feita a elaboração do modelo de blocos, que corresponde a uma representação tridimensional, referenciada espacialmente, das informações geométricas e interpretações geológicas (De Oliveira, 2008). Nos blocos de cubagem são representados os atributos espaciais, que correspondem às informações consideradas necessárias para o modelo de recursos, como teor, densidade e informações litológicas (De Tomi, 2001).

### 3.10 Efeito do volume variância

Um grande problema nas operações das minas está associado ao efeito do volume variância que reflete a diferença na escala de amostragem para a escala de trabalho e é consequência da combinação do efeito do suporte e do efeito de informação (Armstrong, 1998).

O suporte de uma amostra é definido pelo volume que ela representa e quando o suporte é muito pequeno quando comparado aos demais suportes considerados, assume-se que ele seja pontual (Vann *et. al.*, 2000).

Na mineração as amostras são coletadas a partir de canais, fragmentos de rocha e furos de sonda. Cada tipo de amostra é capaz de agregar um tipo de informação ao banco de dados. Amostras com diferentes suportes devem ser tratados como diferentes variáveis uma vez que representam volumes distintos e possuem características estatísticas diferentes (Janas, 2001). Em geral, quanto menor o suporte amostral maior a dispersão dos seus valores em torno de um valor médio (Zanetti, 2011).

Para garantir que os diferentes tipos de amostras tenham a mesma representatividade é necessário garantir que eles possuam o mesmo suporte. Para isto, é necessário regularizar as massas e os comprimentos das amostras. O *composite* e a mudança de suporte tem como intuito adequar o intervalo de amostragem ao intervalo de trabalho (Yamamoto, 2002; Zanetti, 2011).

Em depósitos onde o efeito pepita é elevado ou com uma estrutura em pequena escala marcante este efeito de volume variância tende a ser mais pronunciado (Vann *et al.*, 2000).

A escolha do tamanho dos blocos do modelo de bloco é um ponto fundamental para a estimativa dos teores da mina. Segundo Neufeld e Deutsch, (2005) a definição do tamanho do bloco depende sobretudo da variabilidade do depósito e dos equipamentos de mineração. De acordo com Vann *et. al.* (2000) os blocos, em geral, não devem ser menores que a metade do espaçamento entre as amostras.

Em geral, para um determinado teor de corte, quanto maior o tamanho do bloco, maior a diluição e conseqüentemente menor o teor médio (Janas, 2001). Em depósitos homogêneos, é possível ser menos seletivo e dessa forma lavar maiores tonelagens, porém com menor teor. Por outro lado, em depósitos heterogêneos, como é o caso de depósitos de

ouro, é necessário a maior densidade amostral e maior seletividade para que ocorra maior refinamento na classificação do bloco e o risco de defini-lo erroneamente seja menor (Minnitt, 2007).

Durante a definição do bloco como estéril ou minério o conhecimento sobre a mineralização é fundamental e reflete esta definição (efeito de informação). Erros associados à amostragem e à utilização de dimensões inadequadas para o tamanho do bloco podem fazer com que sejam classificados erroneamente, ou seja, blocos que são na realidade estéreis podem ser classificados como minério e/ou vice-versa (Minnitt, 2007).

#### 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização do teste de heterogeneidade foram coletadas alíquotas dos testemunhos de sondagem que foram descritas como *metachert* de toda a estrutura mineralizada. Essas amostras foram britadas em granulação menor que 19 mm e separadas em frações granulométricas pré-definidas utilizando-se uma peneira vibratória (Tabela 2).

Na bancada de descrição de testemunho, inicialmente foram feitos 100 quadrados de 30 x 30 cm, utilizados para as granulometrias maiores e 420 quadrados de 10 cm x 10 cm para as amostras de menor granulometria. Para a faixa entre 6,35 e 4,76 mm apenas 240 quadrados, dos 420 construídos, foram preenchidos.

As amostras foram distribuídas de modo que não houvesse sobreposição dos fragmentos e todo o quadrado fosse preenchido (Figuras 8 e 9). O passo seguinte foi a formação dos grupos de amostras e a seleção de fragmentos, conforme a Tabela 2.

Para garantir a equiprobabilidade e aleatoriedade na seleção dos fragmentos, minimizando assim a possibilidade de viés, foram tomados alguns cuidados, como não sobrepor os grãos e não olhar para os fragmentos durante a execução da tarefa.

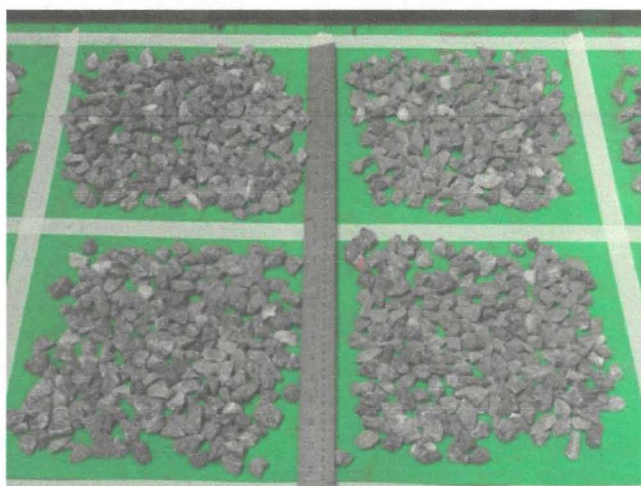
De cada grupo, 10% dos fragmentos foram enviados para análise granulométrica e 90% foram enviados para análise química (utilizando *fire assay*).

**Tabela 2:** Condições experimentais para o teste de heterogeneidade

Faixa granulométrica	Malha	N amostras	N fragmentos
19 e 12,7 mm	30 cm x 30 cm	100	100
12,7 e 9,5 mm	30 cm x 30 cm	50	100
9,50 e 6,35 mm	30 cm x 30 cm,	50	100
6,35 e 4,76 mm	10 cm x 10 cm,	50	240
4,76 e 3,35 mm	10 cm x 10 cm,	50	420



**Figura 8:** Fragmentos distribuídos sobre quadrados 30 x 30 cm.



**Figura 9:** Fragmentos distribuídos sobre quadrados 10 x 10 cm.

De posse dos resultados de teores para as amostras, foi realizado o cálculo da estimativa do fator constante de heterogeneidade constitucional (fator  $IH_L$ ) para cada fração granulométrica com base na massa média dos fragmentos e na média ponderada do teor de ouro para cada grupo de fragmentos.

O produto dos fatores forma, granulometria, mineralogia e liberação do material foram obtidos experimentalmente.

A partir do teste de heterogeneidade e da determinação do  $IH_L$  para os diferentes diâmetros nominais foram calculadas as desvios padrões adicionados em cada etapa, conforme:

$$\sigma^2_{FSE} = K * d_n^\alpha * \left( \frac{1}{M_S} - \frac{1}{M_L} \right)$$

onde  $M_L$  é a massa do lote do material,  $M_S$  corresponde a alíquota retirada,  $d_n$  corresponde ao diâmetro nominal e  $\alpha$  corresponde a inclinação da reta estimada experimentalmente.

Para a comparação entre os recursos estimados pelos diferentes protocolos uma campanha de sondagem realizou sete furos, em uma malha de 40 x 40 m, com testemunhos diâmetro de 36,4mm (BQ) com o objetivo de adicionar recursos à mina.

Amostras de BIF e MCH (Figura 10) com comprimento entre 60 cm e 1 m foram demarcadas na zona mineralizada, sempre respeitando o contato litológico. Após estas amostras serem coletadas em sua totalidade, realizaram-se testes de densidade pelo método de balança hidrostática para que logo depois pudessem ser enviadas para o laboratório interno para preparação e análise de teores seguindo o protocolo atual de amostragem (item 3.4.1)



**Figura 10:** Testemunhos de sondagem (a) BIF e (b) MCH.

O material britado e não utilizado dessas amostras, aproximadamente 2 kg por amostra, foram separados em dois lotes, um contendo as amostras de MCH e um com as amostras de BIF. Estas alíquotas de material britado foram reetiquetadas e enviadas para um laboratório externo para serem analisados seguindo o protocolo proposto (item 3.4.2).

Uma vez finalizadas as análises pelos laboratórios, os bancos de dados foram construídos utilizando as seguintes informações: tabelas *collar*, com as coordenadas das bocas dos furos de sondagens; *survey*, com as informações de direções e inclinações dos furos de sonda; *major*, que contempla dados sobre os tipos litológicos; e *assay*, com os dados relativos aos intervalos das amostras, número das amostras e teores de ouro.

A validação do banco de dados foi feita com a finalidade de verificar a presença de erros de digitação, ausência de valores em campos-chave, valores perdidos e conferência dos dados filtrados. Esta etapa é de extrema importância pois garante integridade da informação, diminuindo assim erros durante o processo de geração do modelo.

A confecção do modelo geológico tridimensional foi realizada a partir de seções paralelas aos furos de sonda no programa *Leapfrog Mining*<sup>®</sup>. O sólido gerado foi exportado para o programa *Datamine Studio 3*<sup>®</sup> onde foi criado o modelo de blocos com os atributos de interesse e realizadas as etapas de avaliação dos recursos para cada um dos bancos de dados construídos com os diferentes protocolos de amostragem.

Uma vez que os domínios de estimativa foram definidos, iniciou-se a etapa de análises estatísticas das amostras dentro de cada um destes domínios, seguida da análise geoestatística utilizando os mesmos parâmetros de vizinhança utilizados pelo planejamento de longo prazo da empresa.

Finalmente, o modelo de blocos fora estimado utilizando-se o método de krigagem ordinária (KO), uma vez que o objetivo foi avaliar a diferença entre os protocolos, qualquer método de estimativa poderia ter sido utilizado. A partir dessas estimativas foram calculados os teores médios e a tonelagem da estrutura mineralizada.

## 5. RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Teste de heterogeneidade

A partir dos resultados dos teores de ouro obtidos pela análise das amostras foi possível determinar o valor de  $IH_L$  para cada fração granulométrica.

Os resultados foram plotados em um gráfico bi-log que correlacionam os valores dos produtos das variâncias pela massa da amostra ( $\sigma^2_{FSE} * M_s$ ) com os respectivos valores de diâmetro nominal ( $d_N$ ) (Figura 11).

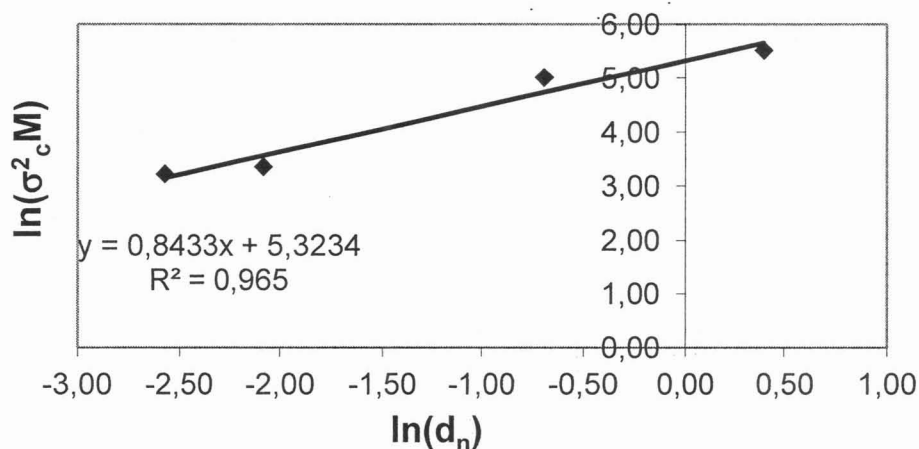


Figura 11: Correlação entre  $\sigma^2_{FSE} * M_s$  e  $d_n$ .

Os valores das constantes  $k$  e  $\alpha$  encontram-se na Tabela 3, em que  $k$  corresponde ao produto dos fatores forma, granulometria, mineralogia e liberação do material e  $\alpha$  é a inclinação da reta.

**Tabela 3:** Valores de  $k$  e  $\alpha$  estimados a partir do teste de heterogeneidade

Constante	Valor
$\alpha$	0,84
$k$	205,08
$\ln(k)$	5,32

## 5.2 Análise dos protocolos

A partir da determinação do  $IHL_L$  para os diferentes diâmetros nominais e dos desvios padrões ( $s(FSE)$  rel) adicionados em cada etapa foi construída a Tabela 4 com o procedimento sequencial do protocolo atual de amostragem e os respectivos valores de variância relativa ( $s^2(FSE)$ ). O desvio padrão total do erro fundamental é de 59%, valor muito superior ao recomendado para minérios de ouro que é de 10% (Minnitt *et al.*, 2007). Ao analisar cada etapa individualmente observa-se que o maior valor de desvio é gerado no quarteamento da amostra, que reduz a massa de 2 kg para 500 g.

**Tabela 4:** Sequencia de procedimentos do protocolo atual.

Etapa	Massa inicial (g)	Massa final (g)	$d_n$ (cm)	$IHL$	var rel $s^2(FSE)$	dev pad rel $s(FSE)$ rel
1. Amostra primária	2500	2000	2	367.94	0.0368	19%
2. Britagem	2000	2000	0.63	138.90	0.0000	0%
3. Quarteamento	2000	500	0.63	138.90	0.2084	46%
4. Pulverização	500	500	0.0074	3.27	0.0000	0%
5. Fire Assay	500	30	0.0074	3.27	0.1025	32%
TOTAL					0.3476	59%

$d_n$ - diâmetro de 95% passante

$IHL$ - fator constante de heterogeneidade constitucional

$s^2(FSE)$  – Variância relativa do erro fundamental

$s(FSE)$  rel – desvio padrão relativo do erro fundamental

Apresentam-se nas Tabelas 5 e 6 a sequência de procedimentos propostos para a análise das amostras de BIF e MCH, com as respectivas variâncias relativas ( $s^2(FSE)$ ) e os desvios padrões relativa ( $s(FSE)$ ).

**Tabela 5:** Protocolo sugerido para a BIF.

Etapa	Massa inicial (g)	Massa final (g)	$d_n$ (cm)	$IHL$	var rel $s^2(FSE)$	dev pad rel $s(FSE)$ rel
1. Amostra primária	2500	2000	2	367.94	0.0368	19%
2. Britagem	2000	2000	0.63	138.90	0.0000	0%
3. Quarteamento	2000	1000	0.63	138.90	0.0695	26%
4. Pulverização	1000	1000	0.0074	3.27	0.0000	0%
5. Fire Assay	1000	50	0.0074	3.27	0.0621	25%
TOTAL					0.1684	41%

$d_n$ - diâmetro de 95% passante

$IHL$ - fator constante de heterogeneidade constitucional

$s^2(FSE)$  – Variância relativa do erro fundamental

$s(FSE)$  rel – desvio padrão relativo do erro fundamental

**Tabela 6:** Protocolo sugerido para a MCH.

Etapa	Massa inicial (g)	Massa final (g)	d <sub>n</sub> (cm)	I <sub>hl</sub>	var rel s <sup>2</sup> (FSE)	dev pad rel s(FSE) rel
1. Amostra primária	2500	2000	2	367.94	0.0368	19%
2. Britagem	2000	2000	0.63	138.90	0.0000	0%
3. Quarteamento	2000	1000	0.63	138.90	0.0695	26%
4. Pulverização	1000	1000	0.0074	3.27	0.0000	0%
5. Análise química	1000	1000	0.0074	3.27	0.0000	0%
TOTAL					0.1062	33%

d<sub>n</sub>- diâmetro de 95% passante

I<sub>hl</sub>- fator constante de heterogeneidade constitucional

s<sup>2</sup>(FSE) – Variância relativa do erro fundamental

s(FSE) rel – desvio padrão relativo do erro fundamental

Nos protocolos utilizados há sucessivas etapas de redução de massa e granulação até que as mesmas sejam adequadas para a análise química. Apesar de erros serem adicionados em todas as etapas, os incrementos de desvio padrão associados ao erro fundamental estão associados às etapas em que houve redução de massa em determinada granulometria.

Os protocolos de amostragem sugeridos possuem valor de desvio padrão menores que utilizado atualmente, porém ainda são superiores ao sugerido para este tipo de mineralização.

No protocolo proposto para a BIF, o desvio padrão relativo obtido pelo teste de heterogeneidade foi de 41%, enquanto que para o MCH o desvio padrão relativo esperado é de 33%. Isto ocorre devido o fato do protocolo da BIF envolver uma etapa a mais de redução de massa para análise química. Porém, uma vez que a litologia utilizada para a realização do teste de heterogeneidade foi o MCH, que é mais variável que a BIF, espera-se que para o protocolo da BIF o erro real seja menor que o encontrado na Tabela 5, pois o I<sub>HL</sub> associado a ele é menor que o obtido pelo teste.

### 5.3 Otimização do protocolo

Com o intuito de verificar o tempo ideal para a liberação do ouro pelo processo de lixiviação no MCH, diversos intervalos de tempo foram testados. A diferença percentual de ouro lixiviável nos diferentes intervalos de tempo não foi significativa e foram superiores à 87% em todos os intervalos evidenciando a grande quantidade de ouro cianetável nesta litologia (Tabela 7).

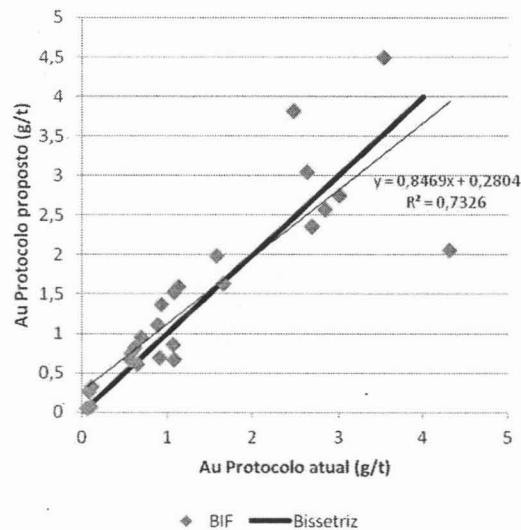
**Tabela 7:** Média da porcentagem de Au lixiviável em diferentes tempos

Tempo (h)	% Au lixiviável
4	88,73
6	89,82
8	90,1
10	87,95
12	90,71

#### 5.4 Análise de teores

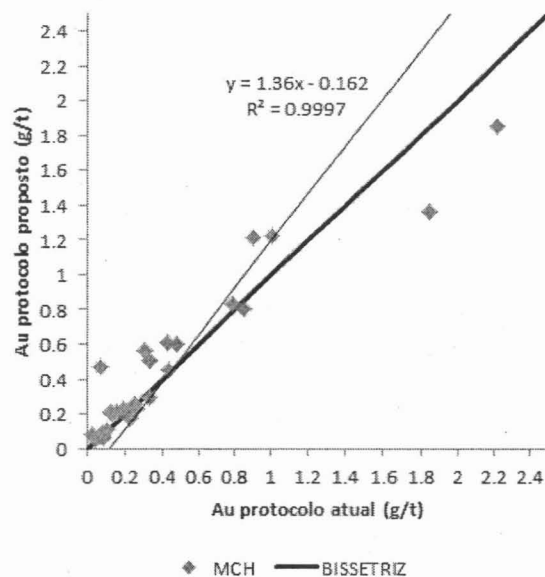
A análise do banco de dados geral da empresa permitiu concluir que a maior parte do ouro livre presente na mina é muito fino e não é possível visualizá-los a olho nu (ausência de Au livre nas descrições dos testemunhos) apesar dos altos teores das amostras. As maiores partículas descritas possuem no máximo 800 micras e é comum aparecerem em agrupamentos associados com partículas mais finas.

Com o intuito de comparar os teores de Au obtidos para cada um dos protocolos foram construídos diagramas de dispersão com os teores das amostras obtidos para cada uma das litologias (Figura 12 e 13).



**Figura 12:** Diagrama de dispersão comparando os resultados de teores para a BIF obtidos por cada protocolo.

Para as amostras de BIF a maioria dos pontos foram plotados acima da bissetriz, confirmando os teores mais elevados obtidos pelo protocolo proposto.



**Figura 13:** Diagrama de dispersão comparando os resultados de teores para o MCH obtidos por cada protocolo.

Assim como para as amostras de BIF, a maioria dos pontos foram plotados acima da bissetriz.

### 5.5 Análise estatística

A partir da validação dos bancos de dados foram gerados dois arquivos de furos no programa Datamine Studio 3<sup>®</sup>, cada um deles com os respectivos assays obtidos com os diferentes protocolos de amostragem. A partir destes arquivos foram feitas as estatísticas descritivas (Tabela 8) e histogramas (Figura 14) para cada um destes bancos dados.

**Tabela 8:** Estatísticas descritivas para cada protocolo

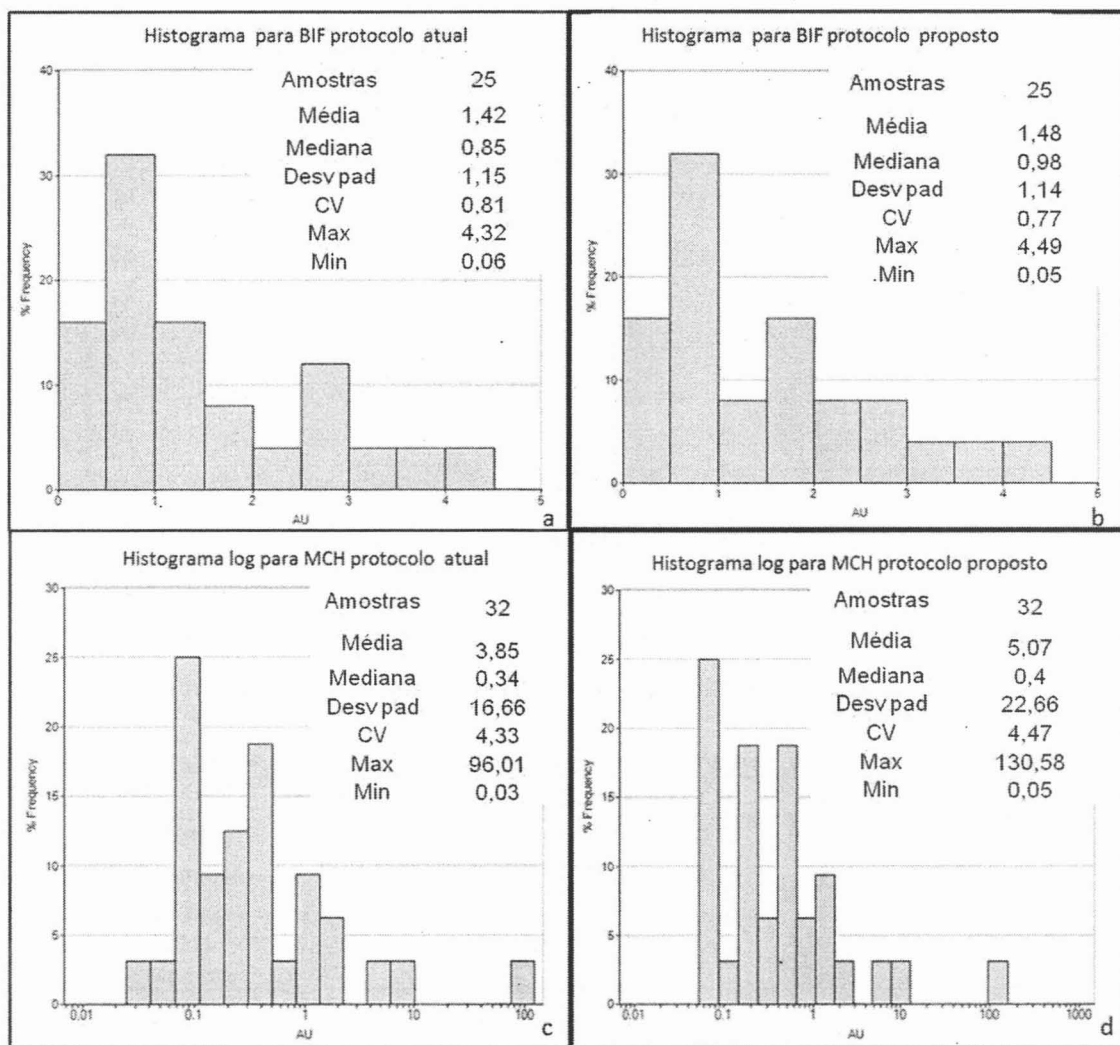
	Amostras	Média	Mediana	Desv pad	CV	Max	Min
BIF atual	25	1,42	0,85	1,15	0,81	4,32	0,06
BIF proposto	25	1,48	0,98	1,14	0,77	4,49	0,05
MCH atual	32	3,85	0,34	16,66	4,33	96,01	0,03
MCH proposto	32	5,07	0,4	22,66	4,47	130,58	0,05

É possível observar na Figura 14 que todos os histogramas apresentam assimetria positiva, compatíveis com o que é esperado para depósitos de ouro e outros metais preciosos.

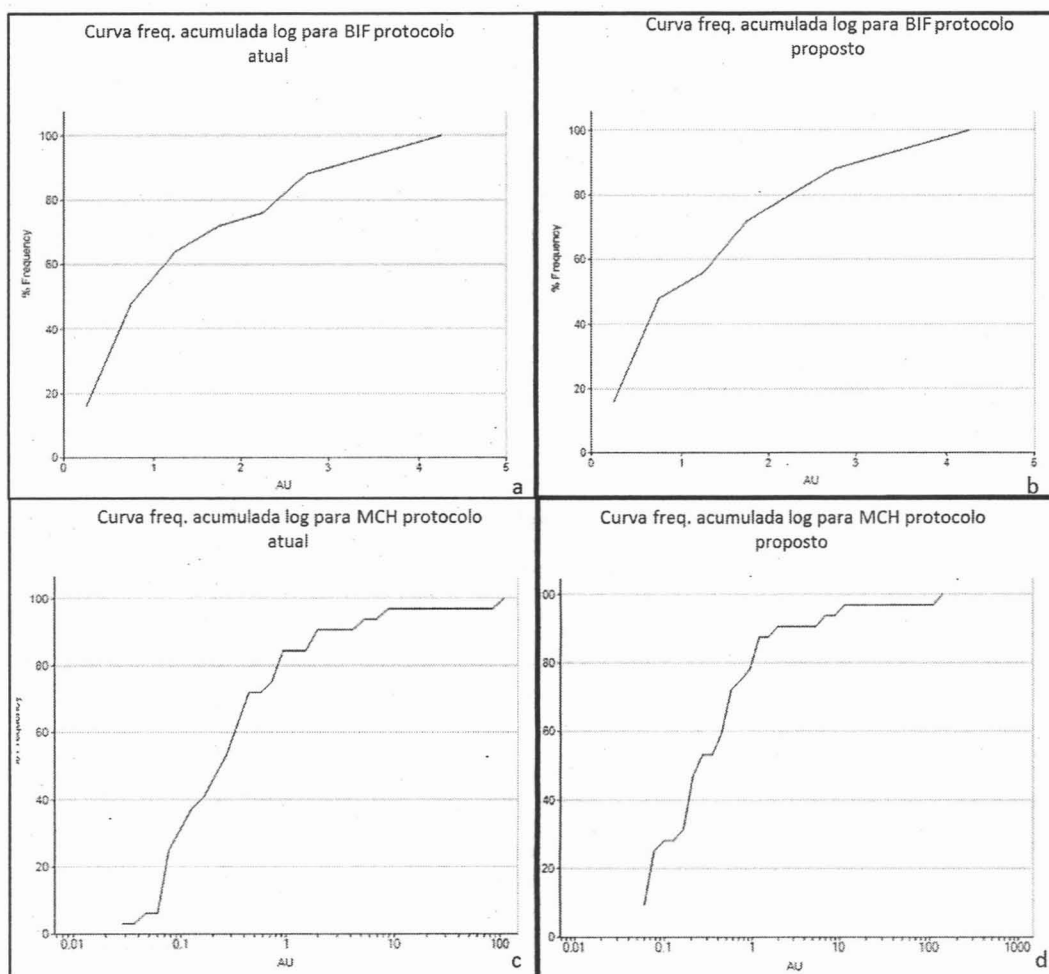
Para as amostras de BIF, os histogramas de ambos os protocolos mostram duas populações com comportamento semelhante, uma com teores baixos e outra com teores altos. Ao comparar o histograma (a) com o (b) é possível observar que a população com maiores teores possui um comportamento mais simétrico no protocolo proposto. Esta distribuição bimodal está evidente na curva de frequência acumulada (Figuras 15 (a) e

(b)), a inflexão da curva no protocolo proposto ocorre próxima a 60% das amostras enquanto que para o protocolo utilizado atualmente a inflexão ocorre pouco abaixo dos 80%.

Os histogramas do MCH (Figuras 14 (c) e (d)) foram feitos em escala logarítmica, devido à presença de valores extremos. Para esta litologia, o histograma do protocolo proposto possui comportamento que tende a simétrico, com menos amostras com teores mais baixos. O comportamento mais simétrico do histograma retrata a distribuição log-normal dos teores. As curvas de frequência acumulada (Figuras 15 (c) e (d)) também mostram uma distribuição bimodal para esta litologia.



**Figura 14:** Histogramas para cada protocolo (a) atual para BIF, (b) proposto para BIF, (c) atual para MCH, (d) proposto para MCH.



**Figura 15:** Curva de frequência acumulada (a) atual para BIF, (b) proposto para BIF, (c) atual para MCH, (d) proposto para MCH.

Como as amostras enviadas para análise representam 80 cm, este comprimento foi utilizado para regularizar os dados, respeitando-se os limites litológicos (Tabela 9).

**Tabela 9:** Estatísticas descritivas para cada protocolo com *composite* de 80 cm

	Amostras	Média	Desv pad	CV	Max	Min
BIF atual	28	1,55	1,15	0,74	3,88	0,07
BIF proposto	28	1,61	1,18	0,73	4,49	0,06
MCH atual	25	4,63	18,26	3,94	95,1	0,03
MCH proposto	25	6,16	24,83	4,03	129,34	0,05

Pode-se observar que para ambas as litologias o protocolo proposto apresenta uma média de teor superior aos obtidos utilizando-se o protocolo atual da mina. Especificamente para o MCH este valor é 33% maior. Por outro lado o desvio padrão também foi maior para as análises com o protocolo proposto. Sugere-se que estas diferenças é devido a presença de ouro cianetável nas amostras de MCH, que não são contabilizados no protocolo atual na mina.

Foram aplicados *capping* de 20 g/t para a BIF e 100g/t para o MCH. O *capping* corresponde a 98% dos teores nas respectivas litologias (dados históricos). Após esta etapa, novas estatísticas descritivas foram e estão apresentadas na Tabela 10.

**Tabela 10:** Estatísticas descritivas para cada protocolo com *capping* e desagrupamento.

	Amostras	Média	Desv pad	CV	Max	Min	<i>Capping</i>
BIF atual	28	2,01	1,21	0,6	3,88	0,07	20
BIF proposto	28	2,1	1,36	0,65	4,49	0,06	20
MCH atual	25	3,03	11,97	3,95	95,1	0,03	100
MCH proposto	25	3,44	12,66	3,68	100	0,05	100

A aplicação do *capping*, da regularização e do desagrupamento dos dados resultaram em um aumento no teor médio da BIF e uma redução da média do MCH. Como o desagrupamento dá pesos menores para amostras quando há agrupamento amostral, este fato mostra que a amostragem ocorreu em uma região onde a BIF possuía teores baixos e o MCH teores altos.

Com o *capping* de 100 g/t o CV do protocolo proposto para o MCH reduziu de 4,03 para 3,68. E o CV do protocolo proposto para o MCH ficou menor que o utilizado atualmente comprovando o impacto destes teores nas estimativas.

### 5.6 Modelo geológico 3D

A partir do banco de dados global da empresa gerou-se um arquivo de furos no programa *Leapfrog*.

A partir deste arquivo foi definido um prisma no qual o modelo geológico ficaria restrito e foi gerado um modelo implícito para um depósito intrusivo. A partir da modelagem implícita foram definidas seções paralelas aos furos de sondagem (Figura 16) com o intuito de melhorar o modelo inicial. Essas seções foram interpretadas a partir da região do depósito próxima aos furos de interesse. O modelo foi criado com base nos contatos litológicos entre a rocha encaixante, BIF e MCH. As seções foram interpoladas gerando sólidos que foram exportados para o *software* Datamine Studio 3®.

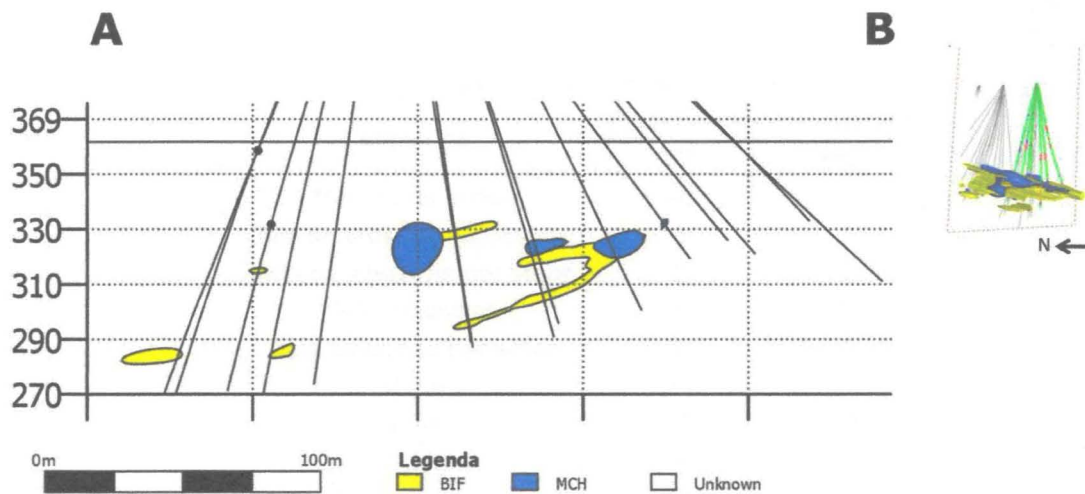


Figura 16: Seção usada para modelar o depósito.

### 5.7 Modelo de blocos

Uma vez que o modelo geológico foi exportado para o Datamine Studio 3<sup>®</sup> o modelo de blocos foi criado.

Os blocos são regulares e apresentam dimensões de 10 metros nos eixos X, Y e Z, compatíveis com o planejamento de longo prazo da empresa com sub-blocos de dimensões de 0,5 m em cada um dos eixos (Tabela 11).

Tabela 11: Dimensão do protótipo do modelo de blocos

	X	Y	Z
N blocos	332	83	136
Dimensão do bloco (m)	10	10	10
Dimensão sub-bloco (m)	0,5	0,5	0,5

### 5.8 Krigagem ordinária

As estimativas de teores para cada um dos protocolos foram feitas por krigagem ordinária (KO) no programa Datamine Studio 3<sup>®</sup>.

Uma vez que o modelo de blocos abrangem uma área muito maior que a região contendo amostras grande parte dos blocos não foram estimados.

A krigagem ordinária foi calculada utilizando busca por octantes. Os parâmetros de vizinhança utilizados nas estimativas foram os mesmos utilizados pelo planejamento de longo prazo da empresa e são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12: Parâmetros de vizinhança

Elipsoide	Parâmetros de Vizinhança	
	BIF	MCH
Método de busca	octantes	octantes
Mín setores com amostras	3	3
Mín de amostras por setor	2	2
Máx amostras	16	16
Máx amostras por setor	6	6
U (m)	25	15
V (m)	30	28
W (m)	8	8
Rotação em x	24	20
Rotação em y	-14	-18
Rotação em z	88	90

Após a KO foi calculada a quantidade de Au e o teor médio para cada um dos protocolos. Esses dados são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13: Resumo de cálculos dos volumes calculados para os diferentes protocolos

	N blocos estimados	Tonelagem (t)	Au (oz)	Teor médio (g/t)	Desvio Padrão	CV
BIF atual	37.975	77.893	4.153	1,66	2,46	1,49
BIF proposto	37.975	77.893	4.424	1,76	2,4	1,35
MCH atual	26.985	72.947	12.111	5,16	14,22	2,75
MCH proposto	26.985	72.947	13.205	5,63	14,99	2,66

Para ambas as litologias a quantidade de Au contido (oz) e o teor médio foram maiores enquanto o CV foi menor para os protocolos propostos quando comparados com os valores do protocolo atual.

Após filtrar os blocos com teor acima do *cutoff* foi estimado o recurso para cada um dos protocolos. Nenhum bloco com teor acima de 2,5g/t foi estimado para a BIF, confirmando a importância do MCH como hospedã da mineralização. Para o MCH, o recurso estimado para o protocolo atual foi de 5.093 oz e para o protocolo proposto 6.151 oz.

Historicamente, para a mina estudada, 30% do recurso são convertidos em reserva. Logo a reserva estimada para o protocolo atual foi de 1.528 oz e para o protocolo proposto 1.845 oz, ou seja, 20% a mais que o protocolo atual. Os dados de recurso e reserva são apresentados na Tabela 14.

**Tabela 14:** Resumo de cálculos do recurso para os diferentes protocolos

<i>Cutoff</i> 2.5g/t	Tonelagem (t)	Recurso Au (oz)	Reserva Au (oz)	teor médio (g/t)
MCH atual	36.613	5.093	1.528	9,06
MCH proposto	39.491	6.151	1.845	9,15

De acordo com o site “Kitco” no dia 2 de novembro de 2016 o preço da onça era de U\$1.304,00 e o gasto médio das grandes empresas de ouro é de U\$1.050,00. Logo, a mudança no protocolo da empresa pode gerar um do novo protocolo iria acarretar em um aumento no lucro da empresa de aproximadamente U\$80.518,00.

## 6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A determinação da variância do erro fundamental de amostragem (FSE) é importante para a implementação de um protocolo de amostragem adequado uma vez que cada depósito mineral possui peculiaridades e características próprias. Além disso, o erro fundamental não pode ser anulado ou negligenciado, portanto é muito importante conhecê-lo.

O teste de heterogeneidade e a determinação das constantes  $k$  e  $\alpha$  comprovaram a variabilidade elevada associada ao depósito estudado. Além disso, os valores de variância relativa adicionadas foram elevados nas etapas em que houve grande redução da massa amostral. Logo, essas etapas são decisivas para a obtenção da precisão desejada e devem ser criteriosamente executadas.

Apesar do número reduzido de amostras, estimou-se, para o protocolo atual, 16.264 oz de Au com teor médio de 1,49 g/t para a BIF e 5,16 g/t para o MCH e para o protocolo proposto 17.629 oz de Au com teor médio de 1,76 g/t para a BIF e 5,63 g/t para o MCH. Além disso, o protocolo proposto estimou uma reserva 20% maior que o protocolo atual, com um lucro de U\$80.518,00.

A redução das variâncias relativas ao erro fundamental e a comparação do recurso estimado pelos protocolos comprovou que seria interessante a alteração do protocolo atual. Além disso, o lucro gerado pela mudança de protocolo é o suficiente para adquirir os equipamentos necessários para tais mudanças.

Além da aplicação do método adequado, recomenda-se a utilização de uma espátula mais fina, reta e que atenda as regras da TOS para pegar os incrementos para a análise por *fire assay* e a utilização do intervalo de tempo ideal para a liberação do ouro cianetável. Uma vez que não houve diferenças significativas nas porcentagens de ouro liberado nos diferentes intervalos de tempo, 4 horas de rotação se mostrou o suficiente para a lixiviação.

É importante ressaltar que a aplicação de um protocolo de amostragem adequado e otimizado é importante para a tomada de decisão na empresa, pois a variabilidade associada ao depósito está ligada ao tipo de mineralização e aos métodos aplicados. Logo,

garantindo que o erro fundamental esteja dentro do recomendado e métodos aplicados adequados as decisões serão tomadas com maior confiabilidade. Por outro lado, para que os resultados obtidos sejam realmente representativos é necessário uma mudança em todo o processo, incluindo todas as etapas de amostragem, com minimização do seu erro total, além da aplicação de um método de estimativa adequado.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Armstrong, M. (1998). *Geoestatística: avaliação de jazidas, planejamento de lavra e interface com análise econômico-financeira*. EPUSP, São Paulo (apostila de curso).
- Barnes, M.P. (1980). *Computer assisted mineral appraisal and feasibility*. New York, Society for Mining Metallurgy. 167p.
- Bergerman, M. G. (2009). *Modelagem e simulação do circuito de moagem do sossego*. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. 207p.
- Bertossi, L. G. (2011). *Proposta para uso do erro de suavização na classificação de recursos minerais*. Dissertação (Mestrado). Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. 105p.
- Bortoleto, D. A. (2015). *Avaliação da heterogeneidade da bauxita de Juruti (PA) visando à otimização de protocolos de amostragem*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. 108 p.
- Chierigati, A. C.; Pitard F. (2012). Fundamentos teóricos da amostragem. In: Chaves, A. P. et al. *Teoria e prática do tratamento de minérios: manuseio de sólidos granulados*. (v. 5. p.323-364); São Paulo;
- De Oliveira, S. B. (2008). *Estudos Geoestatísticos Aplicados a um Depósito Magmático de Ni-Cu*. Dissertação (Mestrado em Recursos Minerais e Hidrogeologia). Instituto de geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. 94p.
- De Tomi, G. (2001). *Modelagem geológica informatizada em datamine*. In: Avaliação e classificação de reservas minerais. São Paulo: v. 38. P. 163-178.
- Deutsch, C. V. (2002). Geostatistics. *Encyclopedia of physical Science and Technology*, 6, 697-707.
- Freitas, D. S. S. (2014). *Avaliação dos protocolos de amostragem para preparação dos produtos de minério de ferro das Minas de Carajás*. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 49p.
- Gouveia, G., Almeida, L., Neiva, F., Cella, P. (2015). *Modelamento Geomecânico 3D Utilizando o Software Leapfrog Geo®*. 15º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, 4-5, Bento Gonçalves.
- Góes, M. de; Luz, A. B.; Possa, M. V. (2004). *Amostragem*. In: Luz AB; Sampaio, J. A.; ALMEIDA, SLM Tratamento de minérios. 4º ed. CETEM/MCT, p. 19.
- Houlding, S. W. (1994). *3D Geoscience Modeling Computer Techniques for Geological Characterization*. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, 309p.
- Janas, M. J. (2001). Change of support correction in mineral resource estimation. Thesis (Master of Science). Edith Cowan University, Perth, 169p.
- Koyama, I. K. (2009). *Teste de heterogeneidade como método de otimização de protocolos de amostragem*. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Minas). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. 15p.

- Koch, G. S. e Link, R. F. (1971). *The coefficient of variation-a guide to the sampling of ore deposits. Economic Geology*, 66(2), 293-301.
- Landim, P. M. B. (2003). *Análise estatística de dados geológicos*. São Paulo: Editora UNESP, 2003. 253 p.
- Magalhães, F. B. (2008). *Estudo de rotas de tratamento e disposição de resíduo de análise de ouro por chumbo - Fire Assay*. Dissertação (Mestrado). Instituto de Ciências Exatas e Biológicas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais. 84 p.
- Minnitti, R. C. A. (2007). Sampling: the impact on costs and decision making. *Journal –South African Institute of Mining and Metallurgy*, 107(7), 451.
- Minnitt, R. C. A.; Rice, P. M.; Spangenberg, C. (2007). Part 2: Experimental calibration of sampling parameters K and alpha for Gy's formula by the sampling tree method. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, 107(8), 513-518.
- Mwasinga, P. P. (2000). *Optimizing sampling protocols for a base metal deposit*, Proceedings of Geostat 2000 (CD-ROM), KLEINGELD, W.J., KRIGE, D. (ed.) p. 1-13
- Neufeld, C., Deutsch, C. V. (2005). Calculating Recoverable Reserves with Uniform conditioning. v. 5, 1065-1070. *Proceedings of IAMG*.
- Pitard, F.F. (1993). Pierre Gy's sampling theory and sampling practice: heterogeneity, sampling correctness, and statistical process control. 2nd ed., CRC Press, Boca Raton, Florida.
- Pitard, F. F. e Stevens, D. (2011). The development of a solution to the sample preparation of coarse gold samples. *Proceedings from the 5th World Conference of Sampling and Blending (WCSB5)*. p.331-334.
- Poniewierski, J. (2016). Negatively Geared Ore Reserves – A Major Peril of the Break-Even Cut-Off Grade., *Australasian Institute of Mining and Metallurgy: Adelaide, SA, Australia*.
- Vann, J.; Guibal, D.; Harley, M. (2000). Multiple Indicator Kriging – Is it suited to my deposit. *Proceedings of the 4th International Mining Geology Conference, may 2000. The Australasian Institute of Mining and Metallurgy: Melbourne Coolum, Qld, Australia*.
- Yamamoto, J. K. (2001). *Avaliação e classificação de reservas minerais*. 1ª ed., São Paulo SP, Ed. Edusp
- Yamamoto, J. K. (2002). *Apostila do Curso de Geoestatística da USP*. São Paulo. São Paulo. 82p.
- 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., Bettencourt, J. S., 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*. 1ª ed., São Paulo, SP. ED. Oficina de Textos.

Zanetti, G. S. (2011). *Avaliação da krigagem indicadora para o depósito de Ouro de Suruca – GO*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil. 122 p.

DOAÇÃO	<i>Graduação</i>
<i>16c</i>	
Data:	<i>20 / 03 / 18</i>