UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**Modelagem geológica e avaliação dos recursos minerais de ouro e
prata na Fazenda São Daniel - Carambeí - PR**

VINICIUS DIAS SERRANO

Orientador: Prof. Dr. Jorge Kazuo Yamamoto

Dissertação de Mestrado

Nº 800

COMISSÃO JULGADORA

Dr. Jorge Kazuo Yamamoto

Dr. Paulo Milton Barbosa Landim

Dr. Giorgio Francesco Cesare de Tomi

Dr. Gustavo Correa de Abreu

SÃO PAULO
2018

VINICIUS DIAS SERRANO

MODELAGEM GEOLÓGICA E AVALIAÇÃO DOS RECURSOS MINERAIS DE
OURO E PRATA NA FAZENDA SÃO DANIEL – CARAMBEÍ – PR

Dissertação apresentada ao Programa
de Pós-Graduação em Recursos
Minerais e Hidrogeologia do Instituto de
Geociências da Universidade de São
Paulo para a obtenção do título de
Mestre em Geociências

Área de concentração: Geologia
Econômica

Orientador: Prof.^o Dr. Jorge Kazuo
Yamamoto

São Paulo
2018

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Serviço de Biblioteca e Documentação do IGc/USP

Ficha catalográfica gerada automaticamente com dados fornecidos pelo(a) autor(a)
via programa desenvolvido pela Seção Técnica de Informática do ICMC/USP

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de catalogação da publicação:

Sonia Regina Yole Guerra - CRB-8/4208 | Anderson de Santana - CRB-8/6658

DIAS SERRANO, VINICIUS
MODELAGEM GEOLÓGICA E AVALIAÇÃO DOS RECURSOS
MINERAIS DE OURO E PRATA NA FAZENDA SÃO DANIEL -
CARAMBEÍ - PR / VINICIUS DIAS SERRANO; orientador
JORGE KAZUO YAMAMOTO. -- São Paulo, 2018.
90 p.

Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação
em Recursos Minerais e Hidrogeologia) -- Instituto
de Geociências, Universidade de São Paulo, 2018.

1. krigagem. 2. modelagem geológica. 3. validação.
4. avaliação mineral. 5. ouro epitermal. I. KAZUO
YAMAMOTO, JORGE, orient. II. Título.

DEDICATÓRIA

Aos meus pais que me proporcionaram condições para que eu pudesse nesse momento concluir esse trabalho. Me deram base e sustento, suprimindo-me de todas as necessidades me dando muito amor.

À minha noiva Eliane, pela compreensão durante esse período do trabalho. Me apoiando nas horas que mais precisei e entendendo o meu tempo dedicado a desenvolver esse trabalho.

Ao meu único irmão Giovane por participar comigo dos momentos de lazer ao longo do desgastante trabalho.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus, pois Dele vem todo meu sustento e nas horas mais difíceis sempre Ele quem me deu o amparo necessário para tudo durante o trabalho.

Também gostaria de agradecer a Capes que me deu o apoio financeiro durante a execução do trabalho. Agradeço também a empresa Terra Pura que forneceu os dados e me proporcionou a realização desse trabalho.

Agradeço ao meu professor Doutor e orientador Jorge Kazuo Yamamoto pela dedicação e empenho ao me orientar nesse trabalho. Também faço o agradecimento ao professor Doutor Gustavo Correa de Abreu que me deu auxílio em diversas partes durante o desenvolvimento do trabalho.

À minha família, mãe, pai, noiva Eliane, irmão e padrasto, pessoas mais próximas de mim durante esse trabalho meus sinceros agradecimentos por me ajudarem quando não tinha mais forças emocionais para escrever o trabalho, após as perdas de meu avô paterno e posteriormente minha avó materna. Perdas sentidas, mas que ficaram para sempre em minha memória e em meu coração.

Serrano, VD. Modelagem geológica e avaliação dos recursos minerais de ouro e prata na Fazenda São Daniel - Carambeí – PR [dissertação]. São Paulo: Instituto de geociências, Universidade de São Paulo; 2018.

Resumo

A área de estudo está localizada na parte sudeste do estado do Paraná, município de Carambeí, PR. Nessa região, há uma ocorrência de ouro conhecida desde a metade do século 18, que foi explorada por garimpeiros. Esse estudo tem por objetivo a modelagem geológica e avaliação de recursos minerais por técnicas geoestatísticas. A mineralização de ouro é encontrada nas rochas hidrotermalizadas do Grupo Castro. A pesquisa mineral foi desenvolvida pela Terra Pura, uma empresa brasileira. Todos os dados da área foram liberados para este estudo. Nesse estudo, foram considerados os dados de sondagens por circulação reversa e diamantada. A primeira questão que surge do uso de dados de diferentes métodos de sondagem se refere ao suporte amostral e consequentemente sua validação. Geralmente, a validação de tais dados é feita usando a aproximação tradicional de furos gêmeos, onde uma é a circulação reversa e outra a diamantada. Isso é muito difícil porque há variação geológica mesmo para pequenas distâncias. Além disso, quando esses dados são comparados em um diagrama de dispersão, o coeficiente de correlação é geralmente baixo. Assim, nesse trabalho foi usada uma nova aproximação estatística para comparar as distribuições de frequências das amostras coletadas nas sondagens por circulação reversa e a diamante. O resultado foi muito bom mostrando uma aderência de mais que 90%, que implica em uma possível mudança dos métodos de exploração, pois o custo da circulação reversa é muito menor que da sondagem diamantada. Essa conclusão permitiu a utilização de ambos os conjuntos de dados para desenvolver as etapas posteriores desta pesquisa objetivando a modelagem geológica e avaliação de recursos minerais usando métodos geoestatísticos. Nesta área, as rochas hidrotermalizadas ocorrem conforme um trend local com direção N45E e mergulhando 30 para SE. Essa informação estrutural foi usada tanto para a modelagem geológica e geoestatística dos recursos minerais resultando em modelos compatíveis e úteis para o entendimento da distribuição de ouro.

Palavras-chave: Krigagem. Modelagem geológica. Validação. Ouro epitermal. Avaliação mineral.

Serrano, V.D. Geological modeling and Gold/Silver mineral resources evaluation in the Fazenda São Daniel, Carambeí – PR. [dissertation] São Paulo. Instituto de geociências, Universidade de São Paulo; 2018.

Abstract

The study area is located in southeastern of Paraná state, municipality of Carambeí. In this region there is an occurrence of gold known since middle of 18th century, which was exploited by prospectors. This study concerns geological modeling and ore resource estimation by geostatistical techniques. The gold mineralization is found within hydrothermalized rocks of the Castro Group. The mineral exploration was developed by Terra Pura, a Brazilian company. All data regarding this area was released for this research. For this study we considered data from reverse circulation and diamond drill holes. The first question that arises from using data coming from different drilling methods is the sampling support and consequently its validation. Usually, validation of such data is made using the traditional approach of comparing twin drill holes, in which one is reverse circulation and the other is diamond drill. This is very difficult because we have geological variation even for short distances. Moreover, when both data are compared in a scattergram, the correlation coefficient is usually low. Thus, in this work we used a new statistical approach to compare frequency distributions of samples collected from reverse circulation and diamond drill holes. The result was very good showing a match of more than 90% that implies in a possible change of exploration methods, because reverse circulation is much cheaper than diamond drill holes. This result allowed us to use both data sets to develop further steps of this research aiming the geological modeling and ore resource estimation using geostatistical methods. In this area hydrothermal rocks occur according to a local trend striking N45E and dipping 30 SE. The structural information was used for both geological and geostatistical modeling of mineral resources resulting and compatible and useful models for understanding the distribution of gold.

Key-words: Kriging. Geological model. Validation. Gold. Mineral resources.

Lista de Ilustrações

Figura 1 - Localização da área de estudo, próxima da cidade de Castro, PR. (Google Earth, 07/08/2013).....	16
Figura 2: Rede de drenagem regional da Região da Sub-bacia Hidrográfica do Rio Tibagi.....	18
Figura 3: Mapa com os diferentes climas do estado do Paraná segundo a classificação de Köppen.....	19
Figura 4: Mapa de temperaturas médias do Estado do Paraná. Fonte: IAPAR.	20
Figura 5: Mapa de precipitação pluviométrica média anual do Estado do Paraná. Fonte: IAPAR.	20
Figura 6: Mapa de precipitação do mês mais seco para a região de Castro.....	21
Figura 7: Mapa geológico da área de estudo abrangendo o Domínio Apiaí (porção Meridional da Província Mantiqueira) e os Terrenos Curitiba e Luís Alves.	22
Figura 8: Mapa Geológico - Fazenda São Daniel - Carambeí – PR.....	25
Figura 9: Alvos representando a confiabilidade da amostragem. A: baixa precisão e baixa acurácia; B: baixa acurácia e alta precisão; C: alta acurácia e baixa precisão; D: alta acurácia e alta precisão	40
Figura 10: Localização dos alvos trabalhados na dissertação	45
Figura 11: Mapa geológico com os resultados das amostras de chip enviadas ao laboratório	46
Figura 12: Mapa de detalhe dos alvos dentro do alvará de pesquisa.	47
Figura 13: Mapa de detalhe de um dos alvos dentro do alvará de pesquisa.....	48
Figura 14: <i>Strip log</i> de furo de sondagem mostrando a relação da geologia e teores de Au e Ag.....	52
Figura 15: Seções 01, 02, 03 e 04, com a interpretação geológica e os pseudofuros.	55
Figura 16: Seções 05, 06, 07, 08, 09 e 10 com a interpretação geológica e os pseudofuros.....	56

Figura 17: Seções 11, 12, 13, 14 e 15 com a interpretação geológica e os pseudofuros.....	57
Figura 18: Modelo geológico com todas as litologias (visada1).	59
Figura 19: Modelo geológico com todas as litologias (visada 2). No veio de quartzo em verde pode-se observar o acamamento geral do minério.	60
Figura 20: Modelo geológico com a faixa mineralizada (visada 1).	60
Figura 21: Modelo geológico com a faixa mineralizada. Nota-se o acamamento geral das camadas (visada 2).	61
Figura 22: Gráfico de probabilidade acumulada e histograma para análises de ouro e prata no grupo amostral siltito.	62
Figura 23: Gráfico de probabilidade acumulada e histograma para análises de ouro e prata no grupo amostral veio ferruginoso.	62
Figura 24: Gráfico de probabilidade acumulada e histograma para análises de ouro e prata no grupo amostral veio de quartzo.	63
Figura 25: Gráfico de probabilidade acumulada e histograma para análises de ouro e prata no grupo amostral brecha.	63
Figura 26: Gráfico de probabilidade acumulada e histograma para análises de ouro e prata no grupo amostral solo.....	64
Figura 27: Gráfico de probabilidade acumulada e histograma para análises de ouro e prata no grupo amostral siltito ferruginoso.	64
Figura 28: Gráfico de probabilidade acumulada e histograma para análises de ouro e prata no grupo amostral riolito.....	65
Figura 29: Gráfico de probabilidade acumulada e histograma para análises de ouro e prata no grupo amostral pórfiro.	65
Figura 30: Estatísticas para sondagem de circulação reversa (RC).....	67
Figura 31: Estatísticas para sondagem rotativa diamantada.	68
Figura 32: Variograma de ouro calculado para as direções 45º/0, 135º/30 e 315º/60.	69

Figura 33: Variograma de prata calculado para as direções 45º/0, 135º/30 e 315º/60.	70
Figura 34: Gráfico de dispersão cumulativa de teores das amostras da sondagem RC (verde) e diamantada (vermelho).	74
Figura 35: Modelo de blocos de krigagem de ouro. Cores frias destacam os melhores teores.	75
Figura 36: Modelo de blocos de krigagem de ouro. Cores frias destacam os melhores teores. Nova visada.	75
Figura 37: Histograma dos blocos de krigagem calculados para ouro.	76
Figura 38: Ouro contido para diferentes teores de corte.	76
Figura 39: Teores médio de ouro para diferentes teores de corte.	77
Figura 40: Modelo de blocos de krigagem de prata. Cores frias destacam os melhores teores.	79
Figura 41: Modelo de blocos de krigagem de prata. Cores frias destacam os melhores teores. nova visada.	79
Figura 42: Histograma dos blocos de krigagem calculados para prata.	80
Figura 43: Prata contida para diferentes teores de corte.	80
Figura 44: Teores médio de prata para diferentes teores de corte.	81
Figura 45: Gráfico de correlação entre ouro e prata para o domínio veio de quarto com coeficiente de correlação de 0.930.	85
Figura 46: Gráfico de correlação entre ouro e prata para o domínio brecha com correlação de 0.849.	85

Índice de Fotos

Foto 1: Siltito argilizado com veios hidrotermais de caulim - Fazenda São Daniel....	27
Foto 2: Siltito caulinizado com vênulas hidrotermais de hematita.	28
Foto 3: Ritmitos com estratificação plano-paralela dentro de paleocanal (linha preta) – O paleocanal está expresso pela presença de camadas plano-paralelas (B) inserido dentro do paleocanal (A).	28
Foto 4: Siltito fino com marcas de greta de contração.	29
Foto 5: Riolito com dobras convolutas originadas no fluxo do magma.	30
Foto 6: Riolito brechado por conta da viscosidade da lava (autobrecha).	30
Foto 7: Dique de andesito intemperizado podendo-se observar amígdalas e vesículas.	31
Foto 8: Riolito pórfiro com cristais bipiramidais de quartzo em meio a uma matriz fanerítica muito fina.	32
Foto 9: Depósito de fluxo de massa com clastos variados imbricados.	33
Foto 10: Ignimbrito mostrando clastos soldados formando fiames.	34
Foto 11: Abertura de trincheira mostrando a separação de solo e saprólito.	49
Foto 12: Trincheira recomposta após a descrição e amostragem.	50
Foto 13: Amostra de canal dentro de trincheira.	50
Foto 14: Sonda de circulação reversa em procedimento de sondagem.	53
Foto 15: Sonda diamantada em operação.	53

Índice de Tabelas

Tabela 1: Codificação das litologias identificadas nas sondagens.	58
Tabela 2: Dados estatísticos das análises químicas de ouro nas amostras de canal em trincheira.....	66
Tabela 3: Dados estatísticos das análises químicas de prata nas amostras de canal em trincheira.....	66
Tabela 4: Dados estatísticos descritivos para ambos os métodos amostrais de sondagem.....	73
Tabela 5: Relação dos valores calculados para parametrização de ouro.	78
Tabela 6: Relação dos valores calculados para parametrização de prata	82

Sumário

1. INTRODUÇÃO	15
2. LOCALIZAÇÃO	15
2.1. FISIOGRAFIA.....	16
2.1.1. Geomorfologia	16
2.1.2. Hidrografia	17
2.1.3. Clima	19
3. GEOLOGIA	21
3.1. GEOLOGIA REGIONAL.....	21
3.2. EVOLUÇÃO DA BACIA DE CASTRO	22
3.3. GEOLOGIA LOCAL.....	24
3.3.1 ROCHAS SEDIMENTARES: LUTÍTOS E RUDÁCEAS	26
3.3.2 Riolitos	29
3.3.3 Diques de Andesito.....	31
3.3.4 Pórfiros	32
3.3.5 Depósitos de fluxo de massa.....	33
3.3.6 Depósitos piroclásticos	34
3.3.7 Formação Furnas (porção basal, próximo ao contato com o Grupo Castro) 34	
3.3.8 Diques de Diabásio Correlacionados à Formação Serra Geral	35
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	35
4.2.1. Cálculo e modelagem de variogramas experimentais	36
4.2.2. Krigagem ordinária	36
4.2.3. Krigagem indicadora.....	37
5.2.1 Avaliação técnica	38
5.2.1.1 Amostragem	39
6. MATERIAIS E MÉTODOS	42
6.1. MATERIAIS	42
6.1.1. Desenvolvimento dos trabalhos de pesquisa.....	43
6.2. MÉTODOS	54
6.2.1. Posicionamento das amostras de canal em trincheiras (X, Y, Z).....	54
6.2.2. Inserção de pseudofuros em seções geológicas	54
6.2.3. Modelagem geológica.....	57

7. Resultados Obtidos	59
7.1. Modelo geológico	59
7.2. Análise estatística	61
7.3. Análise geoestatística	68
7.4. Avaliação dos recursos minerais	70
7.5. Discussão dos resultados	83
7.5.1. Modelo geológico.....	83
7.5.2. Análise estatística.....	84
7.5.3. Análise geoestatística.....	86
7.5.4. Avaliação dos recursos minerais	86
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS	87
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87

1. INTRODUÇÃO

Na Fazenda São Daniel, município de Carambeí, PR, ocorrem rochas hidrotermalizadas mineralizadas em ouro. Ocorrências de ouro são conhecidas na região de Castro (PR) próxima a Carambeí, desde a metade do século XVIII, tendo sido explorada por atividade garimpeira Jesuíta (Seoane, 1999). A área de estudo faz parte destas ocorrências e foi pesquisada pela empresa Terra Pura de 2009 até 2013.

Os dados da pesquisa mineral foram disponibilizados para o desenvolvimento deste trabalho de pós-graduação. O trabalho tem como objetivo refinar os dados antes trabalhados em relatório de pesquisa entregue ao antigo DNPM. Tendo em vista que os cálculos de cubagem antes foram realizados através de métodos convencionais

A partir dos dados de campo da pesquisa mineral para ouro na região de Castro, PR, pretende-se obter um modelo geológico detalhado dos diversos tipos de rocha presentes na área, bem como uma estimativa dos recursos de ouro na área e sua correlação com as rochas.

2. LOCALIZAÇÃO

A Bacia de Castro está localizada no estado do Paraná. O acesso à área se dá, partindo da cidade de Castro – PR, pela rodovia Senador Flávio Carvalho Guimarães (PR-141, km 301), sentido Ponta Grossa (Figura 1).

O Grupo Castro, contido na Bacia de Castro, é composto por riolitos, arcóseos, derrames andesíticos e depósitos rudáceos de idade Pré-Devoniana (Trein e Fuck, 1967). A base da bacia se encontra em discordância angular com as rochas do Proterozóico Superior do Grupo Açungui. Está contida no contexto das bacias transicionais da Plataforma Brasileira, que abrangem os estados de São Paulo, Paraná, Minas Gerais e Santa Catarina, e está inserida no Setor Meridional da Província da Mantiqueira (Almeida e Hasui, 1984 apud Teixeira et al., 2004), assentada sobre um arcabouço complexo e de idades variadas.

Figura 1 - Localização da área de estudo, próxima da cidade de Castro, PR. (Google Earth, 07/08/2013).

Serrano, 2013.

2.1. FISIOGRAFIA

2.1.1. Geomorfologia

Existem cinco unidades geomorfológicas dentro de todo o estado do Paraná. Essas foram primeiramente definidas por Maack (1947), separadas da seguinte forma: Litoral; Serra do Mar; Primeiro Planalto; Segundo Planalto; e Terceiro Planalto.

A localização da área de estudo encontra-se dentro da unidade geomorfológica do Primeiro Planalto.

O Primeiro Planalto é caracterizado por ser uma zona de transição entre a Serra do Mar e a escarpa devoniana. Sua extensão é de 75km, abrangendo altitudes de 850m à 950m, com paisagem levemente ondulada. Os sedimentos fluviais do Quaternário encontram-se depositados sobre as rochas cristalinas antigas formadas por gnaisses levemente à fortemente dobrados, como blocos entre granitos proterozóicos. O escudo cristalino é cortado por rochas da Série Açungui, com direções entre N40º-60ºE. Para oeste encontram-se as rochas de graníticas e quartzo-pórfiros de Castro (Maack, 1947).

2.1.2. Hidrografia

Dentro do estado do Paraná distinguem-se duas bacias hidrográficas de naturezas distintas: endorréica e exorréica. A primeira delas, compondo mais de 92% dos rios da região tem seus rios correndo em direção à calha do rio Paraná, de direção SE. A segunda bacia, de menor porte, é formada por rios curtos e com altos níveis de gradiente. Essa segunda bacia é a Bacia Hidrográfica Atlântica com seu maior representante sendo o Rio Ribeira e diversos rios do litoral paranaense.

A área de estudo está inserida dentro da região da escarpa devoniana, e o principal rio é o Tibagi e sua subbacia e afluentes como: Iapó, Piraí-Mirim, São João e Pitangui (Figura 2).

Figura 2: Rede de drenagem regional da Região da Sub-bacia Hidrográfica do Rio Tibagi.

2.1.3. Clima

A região de Castro apresenta um clima temperado, mesotérmico (Figura 3). A temperatura média no mês mais frio é abaixo de 18°C, os verões são frescos e a temperatura no mês mais quente é abaixo de 22°C (Figura 4). A temperatura média anual é de 17 a 18°C. A estação de seca não é definida (Classificações climáticas do Paraná. IAPAR. Disponível em:

<http://www.iapar.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=863>. Acesso em: 01 mar. 2018).

Figura 3: Mapa com os diferentes climas do estado do Paraná segundo a classificação de Köppen.

Cfa - Clima temperado marítimo

Cfb - Clima oceânico

A densidade pluviométrica média anual da região é de 1800 à 2000mm, como pode ser visto abaixo, próximo a cidade de Ponta Grossa (Figura 5). A menor taxa de precipitação está inserida no trimestre de junho, julho e agosto, sendo agosto o mês menos chuvoso com uma taxa de 75mm de precipitação (Figura 6). A taxa de

precipitação influencia diretamente na produção de minério de ouro através de pilhas de lixiviação, pois a solução de cianeto, solvente do ouro, pode ser diluída se a precipitação de chuvas for intensa.

Figura 4: Mapa de temperaturas médias do Estado do Paraná. Fonte: IAPAR.

Figura 5: Mapa de precipitação pluviométrica média anual do Estado do Paraná. Fonte: IAPAR.

Fonte: IAPAR.

Figura 6: Mapa de precipitação do mês mais seco para a região de Castro.

Fonte: IAPAR.

A pluviosidade influencia diretamente no tratamento de minério na região, haja vista que a empresa Terra Pura tem planta aprovada para o beneficiamento usando o método de lixiviação em pilha e por isso a menor taxa pluviométrica pode auxiliar no menor custo e na maior produção na região.

3. GEOLOGIA

3.1. GEOLOGIA REGIONAL

A Bacia de Castro faz parte do conjunto de bacias do estágio da transição da Plataforma Brasileira. É formada pelo conjunto de rochas que definem o Grupo Castro. Apresenta-se em contato de discordância angular com as rochas do Proterozóico Superior do Grupo Açungui (Almeida e Hasui, 1984 apud Teixeira et al., 2004), e está assentada sobre um arcabouço complexo que formam os Sistemas de Orógenos da Mantiqueira disposto na direção NE-SW, controlados por zonas de cisalhamento transcorrentes de mesma direção (Figura 7).

O Grupo Açungui foi descrito inicialmente como Série Açungui (Derby, 1878). Posteriormente, foi discutido e detalhado por Oliveira (1927), Carvalho e Pinto (1937) e Bigarella e Salamuni (1956, 1958), que o classificaram como Grupo Açungui, sendo atualizado por Marini et al. (1967). O Grupo Açungui é formado por um conjunto de rochas metamórficas de baixo grau, predominantemente

metassedimentos clásticos finos (filitos e metassiltitos) empilhados sobre metassedimentos químicos (metacalcário calcítico e metadolomitos).

Figura 7: Mapa geológico da área de estudo abrangendo o Domínio Apiaí (porção Meridional da Província Mantiqueira) e os Terrenos Curitiba e Luís Alves.

Heilbron et al., 2004

3.2. EVOLUÇÃO DA BACIA DE CASTRO

A Bacia de Castro faz parte de um conjunto de bacias conhecidas como bacias de transição, que se formou no período que corresponderia, sob a visão da tectônica de placas, à fase tardia da colisão continental, conhecida como “fase molássica” (Almeida, 1967).

Junto com a Bacia de Castro, as outras que se enquadram nessa categoria são: Jaibaras, Aurora, São Julião, Cococi no nordeste, Pouso Alegre e Eleutério em Minas Gerais; Camarinhas, Guaratubinha, Itajaí, e também Camaquã na região sul.

Bem como algumas no Uruguai (Playa Verde, Barriga Negra e Cerro de Aguirres) (Almeida *et. al.*, 2010).

Almeida *et al.* (2010) sugerem uma origem comum para todo o período Ediacarano para essas bacias até então chamadas de EoCambrianas do sudeste da América do Sul. Essa interpretação implicaria, necessariamente, que todos os terrenos diferentes na colagem na orogenia Brasileira já estavam juntos em uma única placa à aproximadamente 600 Ma. Uma origem extensional para esses terrenos é adotada através do reconhecimento de falhas normais na sua formação inicial, que posteriormente foram reativadas por movimentação *strike-slip* ou falhamentos inversos, que alimentaram deltas aluviais juntamente com sucessões vulcânicas básicas á ácidas em várias dessas bacias. Sua sedimentação, portanto, é totalmente continental, sem vegetação, formada por drenagens efêmeras, e lagos raros sujeitos a ressecamentos observados em campo com a presença de gretas de contração em pelitos.

A ocorrência de rochas vulcânicas intermediárias e ácidas, assim como granitos cogenéticos, indicaria que o manto e a crosta se fundiram simultaneamente em um evento extensional. As temperaturas elevadas causariam o enfraquecimento térmico da litosfera, possibilitando deformações extensionais e *strike-slip* que formariam zonas de cisalhamento. Essa última estrutura abriu possibilidades para a interpretação da formação tectônica *pull-apart*, porém ocorrida no início do Cambriano, apenas depois da formação da bacia. Muito provavelmente, resultado da propagação de esforços e tensões compressionais que originaram em orogenias colisionais às margens da placa, bem como o fechamento do oceano Yapetus (Fragoso-Cesar, 2008).

3.3. GEOLOGIA LOCAL

A área estudada nesse trabalho já fez parte do estudo no trabalho de formatura do autor (Serrano, 2013)

Dentro da área ocorrem rochas sedimentares e ígneas efusivas.

O posicionamento dessas rochas abaixo descritas pode ser visualizado no mapa geológico na escala 1:10.000 (Figura 8a e Figura 8b).

Figura 8: Mapa Geológico - Fazenda São Daniel - Carambeí – PR.

Serrano, 2013.

Figura 8b: Legenda do Mapa Geológico - Fazenda São Daniel - Carambeí – PR.

Legenda

- Acamamento
- Estrutura de fraturas
- ↑ Bandamento por fluxo de lava
- ⊥ Estrutura de veios
- Curvas de nível
- Falha inferida
- Fratura
- Linha da seção
- Estrutura circular colapsada
- Pontos de mapeamento

Terciário

- Aluvião

Jurássico-Cretáceo

- Diques de diabásio - correlacionados a Formação Serra Geral

Siluriano-Devoniano

- Formação Furnas - Arenitos conglomeráticos

Ordoviciano-Ediacarano**Grupo Castro:**

- Ignimbrito - Matriz mal selecionada com clastos angulosos e arredondados de tamanhos variados por ora soldados e presença de poros
- Gossan - Compõe-se de uma massa ferruginosa formada por hematita, goethita e hematita especular
- Rocha sedimentar ritmica - estratificação plano paralela com a intercalação de níveis argilosos e níveis siltsos
- Lahar - Depósitos conglomeráticos-brechóides de escorregamento
- Veio quartzo adularia (Mirenalizado e estudado)
- Veio quartzo ferruginoso (Mirenalizado)
- Veio quartzoso (Mirenalizado)
- Andesitos de coloração roxa a cinza escuro com presença de vesículas e amígdalas preenchidas por quartzo, e feldspatos ripiformes
- Andesito pórfiro - matriz fina afanítica roxa com fenocristais de feldspato-k sericitizados
- Quartzofeldspato pórfiro - Rocha de composição riolítica de matriz fina e presença de quartzo bipiramidal e feldspato alcalino na forma de fenocristais
- Riólito - Corpos dômicos bandados, com presença de dobras convolutas, fenocristais de quartzo bipiramidais e porções brechadas com estrutura *stockwork* e *jigsaw* cortadas por vênulas milimétricas de sílica e/ou vênulas ferruginosas
- Pelitos e rudáceos de cor branca, verde, bege, vermelha, roxa, ocre e azul apresentando estruturas de anéis de *liesegang*, fraturas em *stockwork*, vênulado por quartzo, caulim e veios ferruginosos e porções com fraturas preenchidas por óxido de manganês

Serrano, 2013.

3.3.1 ROCHAS SEDIMENTARES: LUTÍTOS E RUDÁCEAS

Há uma variedade de rochas sedimentares, que está expressa na granulometria da rocha e, também na composição mineralógica. As porções argilosas são formadas por argilas beges ou ocre, e ocasionalmente alguns grãos de quartzo e feldspato alterado. Outras porções são formadas por caulim de cor branca e porções com ilita, formadas pelo hidrotermalismo, pois se relacionam a intrusões de pórfiros e zonas de argilização (Foto 1 e Foto 2) (Serrano, 2013).

As partes mais grossas (rudáceas) apresentam cor marrom ou vermelha e são formadas por grãos de quartzo, feldspato alterados e raramente hematita

primária. Essas rochas também se encontram hidrotermalizadas, expressos em colorações roxas com intensa hematitização (Serrano, 2013).

As fases de lutito e rochas rudáceas também podem se intercalar, dando origem a rochas sedimentares rítmicas com estratificação plano-paralela (Foto 3). Essa associação também pode apresentar estruturas de gretas de contração (Foto 4) (Serrano, 2013).

Foto 1: Siltito argilizado com veios hidrotermais de caulim - Fazenda São Daniel.

Foto 2: Siltito caulinizado com vênulas hidrotermais de hematita.

Foto 3: Ritmitos com estratificação plano-paralela dentro de paleocanal (linha preta) – O paleocanal está exposto pela presença de camadas plano-paralelas (**B**) inserido dentro do paleocanal (**A**).

Foto 4: Siltito fino com marcas de greta de contração.

3.3.2 Riolitos

Os corpos de riolito encontrados na área formam estruturas dômicas e ou derrames e em campo são diferenciados pela presença de quartzo livre na forma bipiramidal (Serrano, 2013).

Os riolitos apresentam textura fanerítica fina a muito fina e porções porfíricas. Sua estrutura pode ser bandada ou brechada dependendo do ponto de coleta da amostra no derrame dômico (Foto 5 e Foto 6). Por ser um magma viscoso, essas rochas apresentam estruturas de bandamento, e de dobras convolutas e cristais de quartzo rotacionados, também observado em lâmina. O bandamento também pode ser substituído por zonas brechadas, justamente pela alta viscosidade do magma, chegando a se romper em seu resfriamento. Os fenocristais presentes são de quartzo e feldspato-K e a matriz formada predominantemente por vidro vulcânico. Essa matriz quando vista em lâmina apresenta uma textura perlítica, típica de derrames riolíticos, indicando o processo de resfriamento rápido. Partes da lâmina também apresentam um processo de devitrificação (Serrano, 2013).

Os riolitos encontram-se localmente hidrotermalizados com presença de alteração fissural formada por vênulas de quartzo, caulim ou óxido/hidróxido de ferro. A intensidade da alteração pode gerar zonas de *stockwork*, com brechação associada. Algumas zonas também ocorrem *boxwork* de sulfetos intemperizados e pseudomorfos de pirita e goethita. Também ocorrem corpos de riolitos sem interferência da alteração hidrotermal. (Serrano, 2013).

Foto 5: Riolito com dobras convolutas originadas no fluxo do magma.

Foto 6: Riolito brechado por conta da viscosidade da lava (autobrecha).

3.3.3 Diques de Andesito

Em geral, essas rochas são de coloração roxa em estado avançado de intemperismo e, com isso a identificação dessa rocha fica difícil. Sua matriz é fina e está argilizada. A textura é porfirítica com fenocristais de pseudomorfos de plagioclásio caulinizados. Sua colocação é na forma de diques cortando os sedimentos e, também os riolitos que ocorrem na área. Na borda desses corpos de diques de andesito, se podem observar amígdalas ou vesículas (Foto 7) (Serrano, 2013).

Foto 7: Dique de andesito intemperizado podendo-se observar amígdalas e vesículas.

3.3.4 Pórfiros

Os corpos de pórfiro apresentam variação composicional, sendo eles ora com cristais de quartzo na forma de fenocristais, ora com cristais de feldspato potássico e, também há presença dos dois. O que contém apenas feldspato potássico na forma de fenocristais apresenta uma matriz fina cor de chocolate, enquanto que quando há presença de quartzo como fenocristais a matriz é de cor bege-alaranjada (Foto 8). Os cristais de feldspato potássico são euhédricos e os de quartzo são bipiramidais (Serrano, 2013).

Os corpos de pórfiro ocorrem na área na forma de diques encaixados no saprólito de rochas sedimentares (Serrano, 2013).

Foto 8: Riolito pórfiro com cristais bipiramidais de quartzo em meio a uma matriz fanerítica muito fina.

3.3.5 Depósitos de fluxo de massa

Esses depósitos contêm fragmentos variados inseridos em uma matriz mal selecionada argilo-arenosa. Os clastos são angulosos e/ou arredondados e são formados por siltitos com acamamento, siltitos carbonosos e riolitos. Apresentam um imbricamento de clastos indicando um acamamento (Foto 9) (Serrano, 2013).

Foto 9: Depósito de fluxo de massa com clastos variados imbricados.

3.3.6 Depósitos piroclásticos

Essa tipologia de depósito é formada por corpos de ignimbritos de coloração cinza esverdeada e matriz mal selecionada que contém clastos líticos e monominerálicos de variados tamanhos (1mm a 10cm). Apresentam poros e clastos soldados gerando fiames como pode ser observado na Foto 10 (Serrano, 2013). Esses corpos são encontrados fora da estrutura circular presente na Fazenda São Daniel, demarcada na Figura 1.

Foto 10: Ignimbrito mostrando clastos soldados formando fiames.

3.3.7 Formação Furnas (porção basal, próximo ao contato com o Grupo Castro)

Na área, a Formação Furnas é formada por arenitos conglomeráticos de coloração branco a bege claro. A definição indica uma má seleção de grãos, contendo grãos de tamanhos e grau de arredondamento variado. Aparecem grãos de 1 mm até 1 cm e, também grãos angulosos e arredondados. Em sua estrutura

apresenta sets de estratificação cruzada tabular e planos ortogonais de fraturamento de direção N45W a N60W e outro N45W a N30E (Serrano, 2013).

3.3.8 Diques de Diabásio Correlacionados à Formação Serra Geral

Marcam grandes estruturas lineares na área de direção N45W a N60W e, por isso, são facilmente mapeados. Sua textura é afanítica ou fanerítica fina a muito fina, apresentando certa variação da borda para o centro. Os cristais que o compõem são de piroxênio e plagioclásio, observados a olho nu. Devido à composição basáltica, esses são facilmente intemperizados e delimitam grandes vales que podem ser visualizados através de foto aérea (Serrano, 2013).

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1. ANÁLISE ESTATÍSTICA

A análise estatística que precede a quantificação do recurso mineral tem como objetivo caracterizar e descrever estatisticamente os dados, para um melhor entendimento das variáveis de interesse do depósito. Esse estudo preliminar determinará o teor médio e sua distribuição de frequências, bem como à dispersão dos teores. A dispersão pode estar relacionada a erros de amostragem, erros na determinação do teor e na própria variabilidade natural do depósito. O comportamento da variável de interesse em termos da distribuição de frequências pode ser verificado rapidamente nos histogramas, bem como a partir das estatísticas descritivas. Quando se trata de metais raros, como é o caso em estudo, as variáveis podem apresentar uma distribuição com assimetria positiva e, dependendo do coeficiente de variação ($>1,2$), a distribuição pode ser caracterizada como lognormal, que requer procedimentos especiais para o seu tratamento.

É sempre recomendável, antes de se caracterizar a reserva mineral como um todo que se analisem os dados disponíveis, ou ainda aqueles que foram criados a partir dos furos de sondagem, ou trincheiras, bem como das amostragens do tipo rock chip sample, etc.

4.2. ANÁLISE GEOESTATÍSTICA

A análise geoestatística é uma etapa fundamental para a avaliação dos recursos minerais. Esta análise tem por objetivo determinar o modelo de correlação espacial da variável de interesse. O modelo de correlação espacial foi usado para a estimativa de recursos minerais por meio da krigagem ordinária.

4.2.1. Cálculo e modelagem de variogramas experimentais

O cálculo e modelagem de variogramas experimentais são fundamentais para a etapa de krigagem, bem como simulações estocásticas. Os variogramas podem revelar anisotropias quando a variação em uma direção for diferente de outra direção ortogonal. As anisotropias podem ser de três tipos: geométrica, zonal ou mista. A anisotropia geométrica se caracteriza pela existência de um único patamar, mas com amplitudes diferentes conforme as direções pesquisadas. Por outro lado, a anisotropia zonal se caracteriza pela existência de patamares diferentes controlados por uma única amplitude. A anisotropia mista é a combinação dessas duas anisotropias. Os variogramas podem ser contínuos ou descontínuos, se apresentarem efeito pepita.

4.2.2. Krigagem ordinária

A krigagem ordinária é um dos métodos da geoestatística para se estimar um ponto não amostrado a partir da informação da vizinhança próxima. Essa estimativa é feita a partir da minimização da variância do erro, ou seja, a estimativa resultante minimiza a variância de estimativa (Yamamoto, 2000 apud Yamamoto & Landim), 2013. A krigagem usa as informações dos pontos vizinhos e os pesos são calculados levando em consideração a informação estrutural fornecida pelo variograma. A krigagem ordinária pode ser feita tanto em um ponto como em uma área ou bloco de minério. Na mineração, não faz sentido usar a krigagem de ponto, pois a estimativa deve refletir uma unidade de mineração, que é representada por um volume de minério. A krigagem ordinária fornece também uma medida de incerteza, que pode ser medida pela variância de krigagem ou pela variância de

interpolação, conforme proposta por Yamamoto (2000). É importante sempre associar uma medida de incerteza à estimativa obtida, pois esta pode ser avaliada em termos da sua confiabilidade.

4.2.3. Krigagem indicadora

A técnica trabalha com variáveis indicadoras, que são obtidas a partir de transformações não lineares dos dados. O método é apropriado para modelagem de distribuições lognormais (Journel, 1983, apud Yamamoto e Landim, 2013).

Esse método transforma os dados contínuos em variáveis binárias, usando o teor de corte/*cutoff* como referência, segundo a equação (5.1). Sendo assim, a krigagem de variáveis indicadoras atenua contaminações dadas pela presença de amostras com valores altos, *outliers* na distribuição de valores (Yamamoto e Landim, 2013).

$$I(X, ZC) = \begin{cases} 0, & \text{se } Z(x) > ZC \\ 1, & \text{se } Z(X) \leq ZC \end{cases} \quad (5.1)$$

Com isso, a distribuição contínua é reescrita em diversas funções indicadoras com **K** teores de corte diversos.

A krigagem indicadora necessita de um variograma para cada um dos teores de corte adotados. Modelando cada uma das categorias de forma separada. O cálculo do variograma tem como base a média das diferenças entre pontos separados por uma distância **h**. Quando se estabelece teores de corte próximos aos extremos da distribuição de valores não é possível se estabelecer um variograma da indicadora, gerando zonas de incerteza próximo aos extremos da distribuição. Sendo assim o melhor variograma é quando se estabelece um teor de corte igual à mediana dos dados da distribuição (Yamamoto e Landim, 2013).

5.2 AVALIAÇÃO DOS RECURSOS MINERAIS

Dentro de um processo de avaliação de recursos minerais, o objetivo é a obtenção de bases para a tomada de decisões dentro do projeto. Essas bases estão

sustentadas por quatro pilares importantes, que são: avaliação técnica; econômica/financeira; social; e política. Dentro da avaliação técnica podemos destacar a compartimentação geológica, características da mineralização e as tecnologias para a determinação do sistema de produção. A geoestatística proporciona ferramentas reconhecidas como padrão da indústria para a avaliação de depósitos minerais. A avaliação econômica/financeira pode ter por base diversos aspectos sendo eles o custo capital para a implantação do projeto, com a avaliação do valor presente líquido, taxa interna de retorno, tempo de retorno do capital e os riscos associados ao projeto (Revuelta, 2017).

A avaliação social e política, não menos importantes que as avaliações técnica e econômica/financeira, levam em conta aspectos sociais, incluindo o custo social e os benefícios gerados na implantação do projeto mineral (social) e políticas financeiras, cambiais e de emprego do país/estado onde está situado o depósito (política).

5.2.1 Avaliação técnica

As etapas descritas a seguir seguem dentro do pilar de avaliação técnica para a avaliação do recurso mineral dentro da Fazenda São Daniel.

A pesquisa mineral dentro da área da Fazenda São Daniel, Castro, PR, passou por etapas subsequentes de mapeamento geológico juntamente com a coleta de amostras para a análise de ouro e prata (*chip*), análise das áreas de maiores teores com a abertura de trincheiras, seguido pela sondagem rotativa de circulação reversa e sondagem rotativa diamantada.

Para a avaliação do recurso usamos as amostras de trincheiras, sondagens rotativas: circulação reversa e diamantada.

O mapeamento geológico foi realizado na escala de 1:10.000 em uma área total de 40 km². Para a confecção do mapa foram considerados 474 pontos de afloramento, sendo que em parte desses pontos foram coletadas amostras para a análise química de ouro e prata. Nas áreas em que ocorrem veios mineralizados foram feitos mapas detalhados na escala 1:1000 com a ajuda de abertura de trincheiras.

5.2.1.1 Amostragem

A amostragem é um passo importante dentro do processo de delimitação do depósito a ser estimado. É um processo seletivo de um grande grupo (população) a fim de reduzir o tamanho do todo para se obter uma interpretação (Moon et al., 2006). Na indústria mineral, o teor médio é obtido através da amostragem do minério. Essas amostras contêm alguns quilogramas ou poucas toneladas, que serão reduzidas a poucas gramas para serem analisadas conforme os elementos de interesse (Moon et al., 2006). O objetivo da amostragem é gerar valores de interesse sobre a mineralização a ser estudada (ex. teor de ouro). Essa é a informação fundamental a ser utilizada no processo de avaliação. Para isso, a amostragem é usada nos processos de aproximação do valor real do corpo mineralizado (Revuelta, 2017).

Para que se possa usar as amostras de maneira correta é necessário que amostragem seja confiável e represente o valor real sem que haja enviesamento das amostras. Dois parâmetros importantes são utilizados para se ter a confiabilidade das amostras: acurácia e precisão. A acurácia corresponde a diferença entre o valor verdadeiro “real” da amostra e o valor obtido na análise, quanto menor esse valor maior a acurácia de seu método de análise. A precisão corresponde à diferença entre uma análise e a repetição da análise na mesma amostra dar o mesmo valor que a primeira amostragem (baixa dispersão das análises) (Revuelta, 2017). Algumas situações de acurácia e precisão estão ilustradas a seguir (Figura 9).

O trabalho de coleta de amostra se feito de maneira correta ou incorreta pode ser o fator preponderante para a viabilidade ou inviabilidade do projeto. Os custos de amostragem podem não ser efetivos se utilizados de maneira incorreta na coleta da amostra. O tamanho da amostra, diminuição da amostra para diminuição de custo ou até mesmo o tamanho das partículas mineralizadas podem mascarar os verdadeiros valores. Por isso, a técnica de coleta de amostra deve ser adequada para cada tipo material (Revuelta, 2017). Em resumo, a amostra deve apresentar algumas características: (1) resultar uma unidade representativa; (2) carregar pequenos erros; (3) ter custo-eficiência; (4) ter um monitoramento sistemático de viés; (5) os resultados das amostras estudadas devem representar a população com alto grau de confiança (Revuelta, 2017).

Figura 9: Alvos representando a confiabilidade da amostragem. A: baixa precisão e baixa acurácia; B: baixa acurácia e alta precisão; C: alta acurácia e baixa precisão; D: alta acurácia e alta precisão

Fonte: o autor.

Métodos de Amostragem

Os métodos de amostragem são diferentes dependendo da mineralização a ser estudada, bem como o estágio da avaliação do recurso mineral.

No processo de pesquisa mineral existem três métodos principais que são: amostras de canal; amostras de *chip*; e coleta de amostra (Moon et al., 2006). Sinclair e Blackwell (2002) distinguem a amostragem em cinco categorias: linear (canal); pontual (*chip*); painel; “pedaço de solo”; massa.

Amostras de Canal

As amostras de canal estão geralmente condicionadas a afloramentos, trincheiras e desenvolvimento subterrâneo. O método consiste na retirada da amostra ao longo de um canal estreito. A amostragem deve ser feita de modo que a profundidade e largura do canal sejam constantes ao longo de toda a amostragem, garantindo uma massa homogênea para todo o canal. Esse tipo de amostragem é típico para depósitos alojados ao longo de veios, e para obter-se o valor real presente na camada é recomendado retirar-se amostras perpendiculares as camadas.

A amostragem é feita manualmente, podendo ser retirada com o auxílio de martelo, e/ou talhadeira. Posteriormente, a amostra é condicionada em saco plástico, podendo ser quarteada antes do envio ao laboratório. O local da retirada da amostra deve estar limpo para que não haja contaminação entre amostras, raspando-se a parte superior da parede e coletando-se a porção in situ.

O problema do método de coleta de amostra ao longo de canais é a presença de minerais e/ou partes moles, as quais serão retiradas de forma mais fácil que as demais, podendo enviesar a amostra, apresentando maior quantidade de material mole proporcionalmente ao resto da amostra.

O posicionamento das amostras de canal é feito de modo a obedecer a geologia local, cortando ortogonalmente as principais continuidades e/ou estruturas e litotipos presentes na área.

Em resumo, esse método se apresenta como um bom delimitador das zonas mineralizadas, embora se apresente de forma cara, trabalhosa e de maior tempo de execução.

O método de amostragem de canal utilizado em minas subterrâneas ou pesquisa em subsolo serve para guiar os locais a serem minerados. Sua cobertura espacial é ampla, embora apresente empobrecimento na qualidade das amostras devido a um curto período do ciclo amostragem-análise, por conta da urgência da demanda no desenvolvimento da lavra (Rossi e Deutsch, 2014).

Amostras de *Chip*

As amostras de *chip* são aquelas coletadas em um ou mais pontos dentro do alvo do prospecto, podendo ser localizadas ao longo de um perfil ou de forma aleatória. Também podem ser coletadas após detonações da frente de lavra para o controle de seu minério de forma pontual. Esse tipo de amostragem nunca é utilizado para o cálculo de recursos minerais, por se tratar de amostras pontuais e apresentando pouca ou nenhuma representatividade em profundidades. Essas amostras são qualitativas, indicando zonas anômalas dentro da área a ser pesquisada.

Painel

As amostras coletadas na forma de painel são retiradas na forma de *chip* em uma matriz regular contida na frente de lavra a ser amostrada ou qualquer avanço feito pela lavra. São amostras de controle a fim de dimensionar volumes de minério a serem trabalhados nessas frentes.

6. MATERIAIS E MÉTODOS

6.1. MATERIAIS

Para a realização e desenvolvimento do trabalho foi utilizado um banco de dados da empresa Terra Pura, relatório final de pesquisa da área 826.705/2007. O banco de dados contém amostras de furos de sondagem diamantada, furos de sondagem de circulação reversa (RC), amostras de canal em trincheiras e *chip sample*. Sabe-se que os teores obtidos em amostras de sondagens rotativas diamantadas apresentam dispersões distintas daquelas relativas às amostras de circulação reversa (RC). Esse é um problema comum em trabalhos de pesquisa mineral desenvolvidos com dois tipos de sondagem. Assim, há necessidade de se validar essas diferentes amostras para possibilitar a sua utilização na avaliação de recursos minerais.

A geologia da área será contemplada com mapas de detalhe dos alvos trabalhados pela empresa, além de um mapa local na escala 1:10.000. Toda a área apresenta topografia com curvas de nível espaçadas de 5 metros.

Embora existam vários alvos na área, para a realização do modelo geológico e para a cubagem serão utilizados os alvos “L”, “D”, e “Guarininho”, esses que estão dentro do maior *trend* de mineralização da área. No mapa, esse *trend* é destacado como veio quartzo adularia.

Também foram utilizadas as seções dos furos de sondagem, mapa de detalhe das trincheiras e mapas dos trabalhos de prospecção com as devidas localizações dos furos de sondagem e o posicionamento das trincheiras.

Adicionalmente, para as análises estatísticas usou-se do *software* Geovisual e para as análises geoestatística utilizou-se do *software* Geokrige (Yamamoto).

6.1.1. Desenvolvimento dos trabalhos de pesquisa

A aquisição de todos os dados foi feita durante os trabalhos de pesquisa para a cubagem de valores de ouro dentro do alvará 826.705/2007. Essa pesquisa foi finalizada com a realização de um relatório final de pesquisa entregue ao DNPM.

Todo o trabalho seguiu com as etapas predefinidas e com uma sequência nessa ordem: mapeamento geológico e coleta de amostras de *chip*; mapeamento de detalhe com auxílio de trincheiras; locação de furos de sondagem; e por fim avaliação dos recursos.

Mapeamento geológico e coleta de amostras

O mapeamento na escala 1:10.000 foi desenvolvido durante o trabalho de formatura do autor (Serrano, 2013), como mencionado anteriormente. As etapas de mapeamento foram divididas em duas campanhas de campo que entre os meses de janeiro de 2013 (30 dias) e julho de 2013 (30 dias). Nesse período, foi realizado um mapa de pontos com 476 afloramentos mapeados que deram origem ao mapa geológico da área (Figura 8a e Figura). Para esse trabalho, a avaliação dos

recursos minerais usou-se dos alvos Guarininho, L e D que podem ser observados na Figura 10.

Juntamente ao mapeamento coletou-se amostras que posteriormente foram encaminhadas para o laboratório para análise de ouro através do método *bleg* (*bluk leach extractable gold*). O ponto de coleta da amostra, juntamente com o teor obtido na análise gerou um mapa de *chip* (Figura 11), que foi indicativo para as áreas de maior interesse, as quais foram realizados mapeamentos de detalhe (1:1.000) com o auxílio da abertura de trincheiras (Fotos 11 e 12).

Figura 10: Localização dos alvos trabalhados na dissertação

Figura 11: Mapa geológico com os resultados das amostras de chip enviadas ao laboratório

Mapa geológico alvará 826.705/2007 com análises químicas de chip

Fonte: Relatório Final de Pesquisa Alvará 826.705/2007

Fonte: Relatório Final de Pesquisa Alvará 826.705/2007

Abertura de trincheiras coleta de amostras em canal e mapeamento de detalhe

A abertura de trincheiras foi elaborada com base nos dados do mapeamento geológico e das análises químicas de *chip*. As trincheiras seguiam preferencialmente o padrão de cortar ortogonalmente os veios hidrotermais com um espaçamento médio de 25 metros entre elas.

Para a abertura das trincheiras usou-se escavadeira PC-Komatsu 160 e uma retroescavadeira Caterpillar 416. O desenvolvimento seguia o padrão de separar o solo orgânico da parte de saprolito para posteriormente ser feita a recomposição do solo sem impacto nas áreas de pasto e plantio (Foto 11 e Foto 12).

Todas as trincheiras foram mapeadas na escala de 1:100 e amostradas com amostras de canal (Foto 13) a fim de cortar ortogonalmente as estruturas geológicas, litotipos, zonas mineralizadas e veios.

Foto 11: Abertura de trincheira mostrando a separação de solo e saprólito.

Foto 12: Trincheira recomposta após a descrição e amostragem.

Foto 13: Amostra de canal dentro de trincheira.

Locação e realização de furos de sondagem roto-percussiva de circulação reversa (RC) e diamantada

Os trabalhos seguiram com a locação e realização de furos de sondagem. Ao todo foram feitos 41 furos de RC (Foto 14) e 7 furos diamantados (Foto 15). Desse total de 48 furos foram selecionados apenas 28 que estão inseridos dentro do *trend* de mineralização a ser estudado: “L”, “D” e “Guarininho”.

Os furos foram locados com base nos mapas de detalhe de trincheira e seus isoteores em superfície a fim de interceptar o veio mineralizado em diferentes profundidades. Com os testemunhos descritos foram feitos *strip logs* (Figura 14) dos furos para a interpretação e entendimento da relação geologia x teor.

Figura 14: *Strip log* de furo de sondagem mostrando a relação da geologia e teores de Au e Ag.

Foto 14: Sonda de circulação reversa em procedimento de sondagem.

Foto 15: Sonda diamantada em operação.

6.2. MÉTODOS

6.2.1. Posicionamento das amostras de canal em trincheiras (X, Y, Z)

A organização do banco de dados foi realizada com o posicionamento das amostras de canal em trincheira nas suas coordenadas (X, Y e Z). Para esse posicionamento, usou-se o azimuth da trincheira e com o uso de trigonometria básica estabeleceu-se o ponto inicial e final de cada amostra. Os dados foram catalogados em tabela Excel.

Para a colocação da coordenada X de cada amostra usou-se a coordenada X do início da trincheira e foi somado o valor da distância da amostra multiplicado pelo seno do azimuth da trincheira. O posicionamento da coordenada Y foi feito de maneira semelhante, usando o início Y da trincheira e somado a distância da amostra para o início multiplicado pelo cosseno do azimuth. Essa expressão pode ser observada na equação 6.1 e 6.2 respectivamente.

$$\text{Ponto } X = \text{Início } X + \text{sen}(\text{azimute da trincheira}) \quad (6.1)$$

$$\text{Ponto } Y = \text{Início } Y + \text{cos}(\text{azimute da trincheira}) \quad (6.2)$$

O posicionamento da amostra em Z foi feito de maneira mais simples. Usou-se a posição em Z da trincheira e assim somado ou subtraído da altura em que a amostra estava em relação ao ponto Z de partida.

Os dados de trincheira foram usados apenas para controle estatístico das amostras devido a pequena profundidade de amostragem desse método.

6.2.2. Inserção de pseudofuros em seções geológicas

As seções geológicas que já haviam sido estabelecidas em processo de pesquisa mineral foram detalhadas com a realização de seções ao longo dos furos e o posicionamento de novos furos de sondagem fictícios (pseudofuros). Esses novos furos serviram para o controle da geologia e consequentemente modelagem geológica mais precisa da área a partir do *software* Geokrige.

De forma arbitrária, nos pontos em que se notava a ausência de informação era posicionado um pseudofuro e a geologia fora descrita de metro a metro baseado na geologia interpretada a partir dos furos reais. Esses pseudofuros levam a sigla PS e podem ser observados ao longo de todas as seções na Figura 15, Figura 16 e Figura 17. O minério pode ser observado nas litologias de veio de quartzo, brecha e veio de quartzo ferruginoso.

Figura 15: Seções 01, 02, 03 e 04, com a interpretação geológica e os pseudofuros.

Figura 16: Seções 05, 06, 07, 08, 09 e 10 com a interpretação geológica e os pseudofuros.

Figura 17: Seções 11, 12, 13, 14 e 15 com a interpretação geológica e os pseudofuros.

6.2.3. Modelagem geológica

As litologias obtidas nas sondagens RC e diamantada foram usadas para a modelagem geológica. Foi feita uma codificação numérica das litologias, conforme a Tabela 1:

Tabela 1: Codificação das litologias identificadas nas sondagens.

Codificação litologias	
Litotipo	Código
Siltito	1
Veio Ferruginoso	2
Veio de Quartzo	3
Brecha	4
Solo	5
Siltito Ferruginoso	6
Riolito	7
Pórfiro	8

Tendo em vista que se tratam de variáveis discretas, elas não podem ser manipuladas diretamente, mas sim somente por meio de suas funções indicadoras (Yamamoto et al., 2012). Considerando que uma variável categórica é composta por K tipos, a codificação binária para o k-ésimo tipo é feita da seguinte forma (Yamamoto et al. 2012):

$$I(x, k) = \begin{cases} 0, & \text{se } F(x) \neq \text{tipo } k \\ 1, & \text{se } F(x) = \text{tipo } k \end{cases}$$

As funções indicadoras assim obtidas são usadas para interpolação da litologia em um ponto não amostrado, por exemplo, entre duas sondagens. Observar que a codificação indicadora transforma em zeros e uns, ou seja, em probabilidades. Zero quando não existe a litologia e um quando há. Assim, todas as manipulações matemáticas feitas com esses valores, resultarão em valores entre zero e um, portanto, em probabilidades. Segundo Yamamoto (2018, informação verbal), trata-se de uma modelagem probabilística, onde obtém-se K resultados de probabilidades entre zero e um, que devem fechar a soma em 1. Desta forma, a litologia mais provável em um ponto não amostrado é aquela que apresenta o maior valor. Para essa modelagem foi usado o programa Geokrige que permite fazer a modelagem geológica, levando em consideração tanto a anisotropia global como local. No caso da área em estudo, as rochas sedimentares estão orientadas horizontalmente, mas o veio de quartzo corta essas rochas com atitude 135°/30.

7. Resultados Obtidos

7.1. Modelo geológico

O modelo geológico foi elaborado a partir dos furos de sondagem e suas descrições com os *logs* dos furos. A codificação binária foi estabelecida para cada uma das litologias presentes na área conforme a Tabela 1.

Na área, o veio mapeado como quartzo adulária, região a qual será modelada tem direção de rumo do mergulho $135^{\circ}/30$. A zona de interferência do veio de quartzo é a zona brechada e por isso ela acompanha esse acamamento.

Para auxiliar no controle geológico foram realizados os pseudofuros como mencionado acima. Todos os dados de litologia, dos furos reais quanto dos furos fictícios foram modelados através do *software* Geokrige.

Os parâmetros utilizados na modelagem foram de modelo global de direção $135^{\circ}/30$ para os veios de quartzo e a brecha que acompanha o veio, e os demais foram modelados com anisotropia global com os parâmetros horizontais, assim como as camadas sedimentares na região.

O modelo geológico pode ser observado na Figura 18, Figura 19, Figura 20 e Figura 21.

Figura 18: Modelo geológico com todas as litologias (visada1).

Figura 19: Modelo geológico com todas as litologias (visada 2). No veio de quartzo em verde pode-se observar o acamamento geral do minério.

Figura 20: Modelo geológico com a faixa mineralizada (visada 1).

Figura 21: Modelo geológico com a faixa mineralizada. Nota-se o acamamento geral das camadas (visada 2).

7.2. Análise estatística

A análise estatística constituiu o levantamento de 8 diferentes subconjuntos de amostras, estando essas divididas de acordo com a litologia: siltito, veio ferruginoso, veio de quartzo, brecha, solo, siltito ferruginoso, riolito e pórfiro. O banco de dados no total conta com 1776 amostras de canal de trincheiras.

Todos os grupos amostrais apresentam assimetria positiva em seus histogramas, tanto para as análises de ouro como de prata, com exceção dos grupos de pórfiro e riolito. Tal fato se deve principalmente a quantidade de dados amostrais desses grupos amostrais. Os histogramas e gráficos de log probabilidade acumulada podem ser observados nas figuras a seguir (Figura 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29), bem como os dados estatísticos de cada um desses grupos (Tabela 2 e 3).

Figura 22: Gráfico de probabilidade acumulada e histograma para análises de ouro e prata no grupo amostral siltito.

Figura 23: Gráfico de probabilidade acumulada e histograma para análises de ouro e prata no grupo amostral veio ferruginoso.

Figura 24: Gráfico de probabilidade acumulada e histograma para análises de ouro e prata no grupo amostral veio de quartzo.

Figura 25: Gráfico de probabilidade acumulada e histograma para análises de ouro e prata no grupo amostral brecha.

Figura 26: Gráfico de probabilidade acumulada e histograma para análises de ouro e prata no grupo amostral solo.

Figura 27: Gráfico de probabilidade acumulada e histograma para análises de ouro e prata no grupo amostral siltito ferruginoso.

Figura 28: Gráfico de probabilidade acumulada e histograma para análises de ouro e prata no grupo amostral riolito.

Figura 29: Gráfico de probabilidade acumulada e histograma para análises de ouro e prata no grupo amostral pórfiro.

Tabela 2: Dados estatísticos das análises químicas de ouro nas amostras de canal em trincheira.

Estatísticas Descritivas									
Variáveis Categóricas	Número de dados	Média	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação	Máximo	Quartil Superior	Mediana	Quartil Inferior	Mínimo
Siltito	965.00	0.34	0.61	1.83	11.32	0.33	0.22	0.14	0.01
Veio ferruginoso	150.00	0.37	0.84	2.29	9.03	0.31	0.20	0.12	0.00
Veio de quartzo	232.00	1.23	3.48	2.82	41.60	0.85	0.44	0.31	0.10
Brecha	197.00	0.85	2.09	2.47	22.15	0.67	0.43	0.28	0.15
Solo	132.00	0.40	0.24	0.60	1.55	0.45	0.33	0.25	0.04
Siltito ferruginoso	55.00	0.32	0.40	1.26	2.07	0.33	0.21	0.08	0.03
Riolito	31.00	0.26	0.22	0.85	1.23	0.34	0.18	0.11	0.04
Pórfiro	12.00	0.30	0.34	1.16	1.39	0.31	0.18	0.10	0.06

Tabela 3: Dados estatísticos das análises químicas de prata nas amostras de canal em trincheira.

Estatísticas Descritivas									
Variáveis Categóricas	Número de dados	Média	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação	Máximo	Quartil Superior	Mediana	Quartil Inferior	Mínimo
Siltito	965.00	0.20	0.29	1.46	4.04	0.21	0.10	0.05	0.01
Veio ferruginoso	150.00	0.21	0.34	1.66	3.28	0.21	0.10	0.06	0.00
Veio de quartzo	232.00	0.67	1.30	1.93	17.00	0.67	0.37	0.22	0.03
Brecha	197.00	0.51	0.70	1.38	5.99	0.58	0.32	0.13	0.02
Solo	132.00	0.21	0.17	0.79	1.14	0.29	0.15	0.10	0.03
Siltito ferruginoso	55.00	0.23	0.25	1.12	1.40	0.32	0.15	0.03	0.00
Riolito	31.00	0.14	0.08	0.57	0.38	0.17	0.11	0.07	0.05
Pórfiro	12.00	0.18	0.12	0.68	0.52	0.18	0.14	0.08	0.05

Assim, como para as amostras de canal em trincheira, as amostras de furos de sondagem também foram analisadas segundo o método de extração *bleg*.

Separando-se para esse caso apenas os tipos de sondagem, podemos observar que para a sondagem RC o histograma também apresentou comportamento com assimetria positiva, corroborando que se trata de um metal raro. Dentro de um conjunto de dados de 1610 amostras a média foi de 0.404 g/t e o

desvio padrão de 0.510. Como já era esperado, o coeficiente de variação é de 1,262, superior a 1,2 assim como nos casos de metais raros (Figura 30).

Figura 30: Estatísticas para sondagem de circulação reversa (RC).

Analisando de forma semelhante os dados da sondagem diamantada, esses também apresentaram histograma com assimetria positiva e de forma análoga aos dados de trincheira e de sondagem RC obtivemos um coeficiente de variação de 1,399, superior a 1,2. A média foi de 0,430 g/t e o desvio padrão de 0,601.

Podemos assim identificar semelhanças estatísticas entre os dois métodos de amostragem. Porém, a diferença entre eles está mais expressa no desvio padrão dos dados, fato que pode ser observado através da inclinação dos gráficos de log probabilidade acumulada (Figura 30 e Figura 31). No caso da sondagem RC, o desvio padrão é menor e, por isso, o gráfico se apresenta com menor inclinação, ao contrário dos dados da sondagem diamantada. O fato pode ser explicado analisando como se obtém as amostras em cada sondagem. Para a sondagem RC as amostras são diluídas metro a metro, sem que haja uma separação rigorosa da faixa mineralizada, já no caso da sondagem diamantada, em que se observa a faixa

mineralizada, a amostragem é mais rigorosa seguindo os padrões de geologia x minério.

Figura 31: Estatísticas para sondagem rotativa diamantada.

7.3. Análise geoestatística

Para a avaliação geoestatística do veio de quartzo adularia foi usado os dados de campo em que se tem a informação que o acamamento preferencial do veio segue a direção 135°/30 e por isso o cálculo dos variogramas seguiram esse padrão, respeitando a geologia local.

Foram realizados variogramas nas direções 45°/0, sendo a principal direção e para completar as direções ortogonais se calculou nas demais direções de 135°/30 e 315°/60. Os parâmetros utilizados para o cálculo foi o passo de 60 metros. Com a modelagem das três direções obtivemos ajustes pelo modelo esférico e podemos observar e comprovar que a direção preferencial do veio apresenta maior amplitude de correlação entre as amostras 200 metros enquanto que a direção 135°/30 tem

uma correlação entre as amostras de 120 metros e por fim, a última das direções de $315^{\circ}/60$ tem correlação de 70 metros. O efeito pepita foi de 0,05 (Figura 32).

Figura 32: Variograma de ouro calculado para as direções $45^{\circ}/0$, $135^{\circ}/30$ e $315^{\circ}/60$.

A análise geoestatística de prata seguiu o mesmo padrão controlado pela geologia local do veio de quartzo adularia, com acamamento $135^{\circ}/30$ e um passo de 60 metros para a busca. Os variogramas calculados nas mesmas direções também mostraram a melhor correlação ao longo da direção do veio ($45^{\circ}/30$) com uma amplitude de 200 metros. Semelhante aos dados calculados para ouro, a amplitude da direção $135^{\circ}/30$ é de 130 metros, enquanto que a amplitude da direção $315^{\circ}/60$, ortogonal ao veio, é de 40 metros (Figura 33).

Figura 33: Variograma de prata calculado para as direções 45°/0, 135°/30 e 315°/60.

7.4. Avaliação dos recursos minerais

Para a avaliação dos recursos minerais foram usados os dados que abrangem o *trend* de mineralização SW-NE, indicado no mapa como veio de quartzo adúlária. Essa mineralização, dentro do Relatório Final de Pesquisa do alvará 826.705/2007, abrange os alvos indicados como “Guarininho”, “Alvo D” e “Alvo L” como mencionado anteriormente.

No desenvolvimento da pesquisa mineral, em geral, a fase de sondagem é a etapa que mais onera o projeto como um todo. Inclusive, o procedimento de coleta das amostras, bem como suas análises.

Ao longo da pesquisa mineral do alvará 826.705/2007 se buscou ao máximo a redução desses custos com a aquisição de uma sonda RC pela empresa executante do projeto. Além disso, foi montado um laboratório próprio para o controle das análises. Para fim de verificação e confiabilidade dos dados, algumas amostras também eram enviadas para laboratórios certificados (Acme e Geosol).

Na posse da sonda RC, a empresa iniciou essa etapa do trabalho com furos exploratórios, chegando à locação dos furos em locais de maior interesse (veio quartzo adúlária). Durante os trabalhos de pesquisa, a sondagem se desenvolveu de

maneira eficiente e rápida na aquisição das amostras, chegando a execução de 2 furos de 60 metros em um dia de serviço. Seu custo também se mostrou vantajoso.

A locação de uma sondagem diamantada se deu com a finalidade de sanar dúvidas quanto a precisão das amostras (RC) e a relação que elas teriam com os verdadeiros teores em cada trecho mineralizado. Também houve a locação da mesma por dúvida de que o método da sondagem RC fosse aceito perante o órgão fiscalizador (antigo DNPM, hoje Agência Nacional de Mineração). Por isso, foram realizados sete furos de sondagem diamantada, sendo que cinco deles se encontram dentro do *trend* de mineralização quartzo adularia.

Com relação aos custos, a sondagem RC se mostra mais vantajosa, pois apresentou custo médio de R\$ 80,00 por metro amostrado, enquanto a sondagem diamantada apresentou custo elevado, próximo aos R\$ 300,00 por metro amostrado. Cálculo baseado em dados da empresa.

A sondagem RC também apresentou outras vantagens como a velocidade de perfuração e recuperação de amostras em materiais fraturados, locais esses que se encontram os veios mineralizados. Como comentado anteriormente, a sondagem RC rendia dois furos de 60 metros em um dia, enquanto que a sondagem diamantada não ultrapassava os 30 metros em um único furo. Por se tratar de uma recuperação de material através de ar comprimido, a sonda RC recuperava facilmente os intervalos fraturados, enquanto que a sondagem diamantada necessita de materiais consistentes para a recuperação através do barrilete. Por isso, a recuperação da parte mineralizada pela sonda diamantada era menor. Por isso a sondagem rotativa diamantada para essa região deve ser usada para a pesquisa em profundidades maiores, em que o perfil de alteração do solo não influencie na recuperação, onde a rocha esteja sã.

Podemos destacar que a maior vantagem da sondagem diamantada em relação à sondagem RC é a profundidade de alcance, que no caso da pesquisa chegou a mais de 100 metros com facilidade, enquanto que a sondagem RC teve dificuldades para profundidades maiores que 80 metros, devido à limitação do compressor.

É fundamental a comprovação de que os dois métodos fornecem resultados equivalentes.

Aliada à questão do entendimento das respostas dadas por ambos os métodos amostrais, recomenda-se que não se use para fins de cálculos geoestatísticos dois ou mais suportes amostrais distintos (Journel e Huijbregts, 1978 apud Rampazzo, 2017). Rampazzo (2017) propôs a utilização de dois suportes amostrais equivalentes, sondagem diamantada e sondagem de circulação reversa. Para a aferição das respostas dadas por ambos os métodos, Rampazzo (2017) utilizou dois furos próximos a uma distância de 20 metros para fazer a comparação entre teores correspondentes às mesmas litologias. Com base nisso, justificou a utilização de ambos os métodos para os cálculos geoestatísticos, embora a correlação estatística entre os furos tenha sido baixa para a análise de dois pares de furos: 0,698 e 0,597. A utilização de ambas as amostragens em um único banco de dados foi suportada por essas análises e para dar mais consistência aos dados. Na realidade, Rampazzo (2017) fez uma análise de correlação em diagrama de dispersão, que é uma aproximação tradicional usada na indústria mineral. Esse tipo de análise tem uma limitação ligada à dificuldade de obtenção de correlações médias a altas. Observe-se que, por definição, variáveis aleatórias são aquelas cujos valores dependem da realização de experimentos, sobre os quais não se tem controle algum.

Assim, em vista do exposto, será feita uma análise estatística global, por meio de suas distribuições de frequências acumuladas representadas em um único gráfico. Para essa análise, os dados foram regularizados metro a metro pelo método *down-the-hole*, pois as sondagens RC já haviam sido amostradas a intervalos regulares de um metro.

Estatisticamente, os métodos se apresentaram semelhantes com médias de **0,404** e **0,430** para RC e diamantada, respectivamente (Tabela 4). Essa informação reflete o fato que a amostragem RC dilui as amostras, ao passo que a sondagem diamantada não amostra as zonas estéreis, apresentando assim uma média maior. O desvio padrão das amostras, como já mencionado anteriormente no item 7.2, também se apresenta mais baixo no método RC, pois as amostras são diluídas metro a metro, abaixando a diferença entre elas. A diluição da amostra no

método RC pode ser observada através de outros dados estatísticos também, assim como coeficiente de variação.

O que diverge da relação diluição com os parâmetros estatísticos é o do valor máximo, isso porque não se tem controle nas extremidades amostrais, dado que são *outliers*, com valor maior na RC do que na sondagem rotativa diamantada.

Tabela 4: Dados estatísticos descritivos para ambos os métodos amostrais de sondagem.

Estatísticas descritivas das sondagens RC e Diamantada		
Parâmetros	RC	Diamantada
n	1610	311
$\bar{x}$	0.404	0.430
s	0.510	0.601
cv	1.262	1.399
min	0.040	0.130
QI	0.412	0.427
$mediana$	0.288	0.269
QS	0.207	0.203
max	11.800	6.080

Os resultados da comparação global entre as duas distribuições podem ser observados na Figura 34, em que se verifica uma boa aderência em mais de 90% das amostras diamantadas com RC (Figura 34), mostrando assim que ambos os métodos apresentam resultados equivalentes. Pequenas diferenças são passíveis, pois como mencionado anteriormente, há diferenças nas metodologias de amostragem.

Rossi e Deutsch (2014) destacam que a sondagem de circulação reversa é mais barata que a sondagem diamantada, ressaltando que pode fornecer mais informações para dados investimentos. Mostram também que se efetuada de forma cuidadosa sob boas condições de amostragem podem fornecer boas amostras. A dificuldade relatada está no fato de que a sondagem de circulação reversa recupera apenas pedaços de rocha fraturados.

Figura 34: Gráfico de dispersão cumulativa de teores das amostras da sondagem RC (verde) e diamantada (vermelho).

A partir do cálculo dos variogramas foi realizada a krigagem dos blocos (Figura 35 e Figura 36) e sua estatística pode ser observada na Figura 37. Com isso obtivemos valores cubados que podem ser observados nas Figura 38 e Figura 39. Os recursos calculados com o valor de corte de 0,2 g/t foi de 6404kg de ouro para uma tonelagem total 13.512.221. Os recursos obtidos nos teores 0,6 g/t; 1,0 g/t foram de 2498kg e 1434kg respectivamente. Os dados podem ser observados na Tabela 5.

Figura 35: Modelo de blocos de krigagem de ouro. Cores frias destacam os melhores teores.

Figura 36: Modelo de blocos de krigagem de ouro. Cores frias destacam os melhores teores. Nova visada.

Figura 37: Histograma dos blocos de krigagem calculados para ouro.

Figura 38: Ouro contido para diferentes teores de corte.

Figura 39: Teores médio de ouro para diferentes teores de corte.

Tabela 5: Relação dos valores calculados para parametrização de ouro.

Teor de corte simulado (g/t)	Ouro contido (kg)	Teor médio (g/t)
0	6750.398	0.434
0.1	6747.332	0.435
0.2	6404.793	0.474
0.3	5297.712	0.582
0.4	3973.961	0.753
0.5	3122.122	0.928
0.6	2498.767	1.127
0.7	2047.593	1.346
0.8	1764.724	1.547
0.9	1574.044	1.719
1	1434.509	1.867
1.1	1298.989	2.034
1.2	1148.615	2.263
1.3	1069.376	2.409
1.4	1010.662	2.524
1.5	941.583	2.669
1.6	887.297	2.793
1.7	856.287	2.865
1.8	802.401	2.993
1.9	760.427	3.099
2	723.064	3.197
2.1	702.494	3.25
2.2	679.497	3.308
2.3	646.002	3.39
2.4	628.852	3.432
2.5	602.041	3.494
2.6	575.721	3.554
2.7	526.94	3.668
2.8	457.25	3.865
2.9	402.523	4.061
3	358.504	4.262
3.1	350.814	4.299
3.2	340.626	4.347
3.3	327.016	4.41
3.4	318.974	4.445
3.5	316.08	4.457
3.6	309.703	4.481
3.7	298.703	4.518
3.8	267.129	4.628
3.9	202.048	4.952
4	178.362	5.125

Analogamente aos cálculos feitos para o ouro, também foi realizada a krigagem dos blocos (Figura 40 e Figura 41) nos valores de prata com a estatística mostrada na Figura 42. Os resultados apontaram para uma prata contida de 8589 kg a um teor de corte igual de 0,2 g/t. Os valores calculados para os teores de corte de 0,6 g/t e 1,0 g/t foram 6037kg e 4306kg respectivamente. Todos os valores estimados podem ser observados através da Figura 43 e Figura 44 e a Tabela 6 utilizada para a parametrização.

Figura 40: Modelo de blocos de krigagem de prata. Cores frias destacam os melhores teores.

Figura 41: Modelo de blocos de krigagem de prata. Cores frias destacam os melhores teores. nova visada.

Figura 42: Histograma dos blocos de krigagem calculados para prata.

Figura 43: Prata contida para diferentes teores de corte.

Figura 44: Teores médio de prata para diferentes teores de corte.

Tabela 6: Relação dos valores calculados para parametrização de prata

Teor de corte simulado (g/t)	Prata contida (kg)	Teor médio (g/t)
0	9159.891	0.589
0.1	9109.175	0.608
0.2	8589.942	0.749
0.3	7981.309	0.886
0.4	7347.7	1.022
0.5	6673.313	1.172
0.6	6037.557	1.334
0.7	5494.675	1.488
0.8	5062.301	1.626
0.9	4656.98	1.767
1	4306.985	1.901
1.1	4005.002	2.024
1.2	3626.477	2.199
1.3	3310.72	2.371
1.4	3037.837	2.545
1.5	2835.267	2.691
1.6	2663	2.826
1.7	2468.901	2.994
1.8	2291.666	3.168
1.9	2150.815	3.323
2	2054.3	3.438
2.1	1954.305	3.561
2.2	1841.437	3.71
2.3	1741.986	3.854
2.4	1654.922	3.988
2.5	1573.239	4.123
2.6	1513.68	4.226
2.7	1464.058	4.313
2.8	1396.015	4.435
2.9	1331.149	4.559
3	1272.803	4.677
3.1	1226.365	4.773
3.2	1182.484	4.866
3.3	1130.552	4.98
3.4	1072.614	5.114
3.5	1021.676	5.239
3.6	979.527	5.349
3.7	935.814	5.469
3.8	896.62	5.58
3.9	854.064	5.707
4	819.041	5.819

Por fim, com os valores obtidos podemos comparar com os valores antes calculados com o método do perfil padrão, entregue no relatório ao antigo DNPM. Os valores foram de 6578kg para o teor de corte de 0,2 g/t a um teor médio de 0,47 g/t. Os outros valores também calculados foram de 3941kg para o corte de 0,5 g/t, 1897kg para o corte de 0,7 g/t e 840kg para o corte de 1,0 g/t.

A relação dos valores se aproxima, porém não há confiabilidade dos dados quanto as incertezas em locais não amostrados a partir do método dos perfis padrão e linear, o que pode gerar dúvidas quanto a teores médios e as zonas mais ricas do minério. Pode-se assim dizer que o cálculo do perfil padrão homogeneiza as amostras obtendo valores próximos, mas não destaca as zonas de maiores interesses. Esse fato pode ser ressaltado nos teores mais ricos, em que a disparidade aumenta, marcado principalmente pela diferença na cubagem à um teor de corte de 1 g/t, em que a krigagem obteve 1434kg e o perfil padrão obteve 840kg.

7.5 Discussão dos resultados

7.5.1 Modelo geológico

Com base nessas figuras, nota-se a presença das zonas mineralizadas, sendo que a maior delas é a zona brechada. Estatisticamente, essa porção apresentou média de 0,85 g/t de Au, que poderá ser observada no item a seguir. Há maior relevância do veio de quartzo na porção NE do modelo, indicando maiores teores nessa região devido a sua média de 1,23 g/t de Au.

Por isso, em um trabalho futuro de lavra, em que se deseja a recuperação mais rápida do valor investido (Capex), recomenda-se o início dos trabalhos de lavra na porção NE do veio de quartzo, visando o retorno mais rápido do valor investido.

Os pseudofuros serviram de base para o maior controle e geração de um modelo geológico mais fiel à verdadeira compartimentação geológica local. Os pseudofuros levam em consideração a interpretação geológica feita a partir dos furos reais realizados. Com isso, a estruturação geológica e as informações gerais de campo obtidas pelo geólogo e equipe realizadora dos trabalhos podem ser representadas no modelo.

Para a criação do modelo geológico as amostras obtidas a partir dos furos rotativos diamantados representam mais fielmente a verdadeira compartimentação geológica, pois não há mistura de amostras assim como na amostragem feita a partir da sondagem RC.

7.5.2 Análise estatística

Essa análise nos mostrou um controle litológico para as mineralizações de ouro, estando essas concentradas nos *veios de quartzo* e *brechas*. Essas amostras apresentaram maiores médias, quartis e máximos.

Também foram analisadas correlações entre ouro e prata em cada um dos domínios e essas apresentaram coeficientes de correlação: **0,75; 0,84; 0,93; 0,84; 0,63; 0,59; 0,41; 0,93**; respectivamente para os domínios de *siltito*, *veio ferruginoso*, *veio de quartzo*, *brecha*, *solo*, *siltito ferruginoso*, *riolito*, *pórfiro*. Os grupos com mineralizações mais intensas (*veio de quartzo* e *brecha*) apresentaram forte correlação entre as análises de ouro e prata (Figura 45 e Figura 46).

A análise estatística serviu também de base para a comparação dos litotipos definidos e sua correlação com a parte de minério ou estéril. Com isso podemos concluir que os riolitos e pórfiros podem ser considerados litotipos estéreis por apresentarem médias de teores mais baixas, enquanto que a parte de maior teor, podendo ser considerada minério se concentra no veio de quartzo (rico) e brecha (pobre), enquanto que os demais litotipos precisam de análises constantes durante um desenvolvimento de lavra, pois apresentam zonas mineralizadas e zonas estéreis.

Figura 45: Gráfico de correlação entre ouro e prata para o domínio veio de quarto com coeficiente de correlação de 0.930.

Figura 46: Gráfico de correlação entre ouro e prata para o domínio brecha com correlação de 0.849.

7.5.3 Análise geoestatística

A análise geoestatística nos mostrou a anisotropia para as amostras obtidas através das sondagens. Isso mostra o controle geológico para a disposição dos teores do veio de quartzo adularia ao longo do *trend* mineralizado de direção N45E. O variograma mostrou a maior correlação entre as amostras ao longo da direção do veio, como o esperado e a menor correlação ortogonalmente ao veio.

Os variogramas puderam ser modelados e ajustados, gerando um variograma experimental com patamares, amplitudes e efeito pepita definidos. Por isso os cálculos seguintes para a avaliação dos recursos minerais usaram desse modelo de variograma ajustado. Com isso os cálculos se mostram mais fiéis a realidade.

7.5.4 Avaliação dos recursos minerais

A partir da análise e discussão sobre os dados fornecidos e o método como foram tratados para a avaliação dos recursos minerais podemos observar que as amostragens obtidas pelas sondagens rotativa diamantada e RC apresentaram resultados equivalentes, que valida a sua utilização para o cálculo de recursos de ouro. Além disso, esse resultado mostra que ao menos uma parte das sondagens rotativas diamantadas podem ser substituídas por RC, sem grandes perdas de informação. Vale ressaltar que essa comparação de dados foi realizada em cima amostragens rasas, furos em sua maior parte com menos de 100m de profundidade.

Para depósitos superficiais em que não há necessidade de furos profundos, a sondagem RC tem grande vantagem em relação à sondagem diamantada, pois como dito anteriormente as vantagens em termos de custo, tempo para a amostragem, recuperação de trechos fraturados mineralizados são muito superiores. Nesse caso, o mercado da pesquisa mineral pode passar a utilizar mais a sondagem RC em depósitos semelhantes ao da Bacia de Castro, em que mesmo que condicionado aos veios mineralizados, os teores podem ainda permanecer disseminados nas encaixantes.

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O principal resultado apresentado neste trabalho se refere à validação das bases de sondagens por circulação reversa e a diamante, pois pela primeira vez foi utilizada uma análise estatística global, por meio da comparação de distribuições de frequências. Cabe ressaltar que tradicionalmente a validação é feita pela comparação de amostras obtidas em furos gêmeos em um diagrama de dispersão. Entretanto, nem sempre os resultados são bons, pois a própria variabilidade geológica é uma grande fonte de incerteza e que certamente aumenta a dispersão dos pontos no diagrama. Além disso, nem sempre a realização de furos gêmeos é possível para distâncias curtas, pois pode haver desmoronamento ou rompimento de paredes de furos muito próximos.

A modelagem geológica foi feita em etapas considerando diferentes modelos estruturais para as litologias, resultando em um modelo bastante próximo da realidade. Na avaliação de recursos minerais de ouro e prata, por meio de técnicas geoestatísticas, a informação estrutural foi de grande importância para a obtenção de resultados confiáveis e comparáveis aos valores obtidos pelo método dos perfis padrão.

Finalmente, este trabalho foi extremamente importante para a formação complementar do candidato em atividades de modelagem e avaliação de recursos minerais.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, F.F.M. Origem e evolução da plataforma brasileira. Rio de Janeiro, Departamento Nacional da Produção Mineral, Divisão de Geologia e Mineralogia. 241, p. 36, 1967.

ALMEIDA, R. P.; JANIKIAN, L.; FRAGOSO-CESAR, A. R. S.; FAMBRINI, G. The Ediacaran to Cambrian Rift System of Southeastern South America: Tectonic Implications. *The journal Geology*. 118, p. 145-161, 2010.

BIGARELLA, J. J.; SALAMUNI, R. Estudos preliminares na Série Açungui V - Estruturas organógenas nos dolomitos da Formação Capiirú (Estado do Paraná). Dusenía, Curitiba, 7, 6, p. 317-323, 1956.

BIGARELLA, J. J.; SALAMUNI, R. Estudos preliminares na Série Açungui VIII - A formação Votuverava. Boletim do Instituto de História Natural. Geologia, Curitiba, 2, p. 1-6, 1958.

CARVALHO, P. F.; PINTO, E. A. Reconhecimento geológico na Série Assunguy. Bol. Do Serv. Geol. e Min. 71, p. 1-29, 1937.

CLASSIFICAÇÕES CLIMÁTICAS DO PARANÁ. IPAR. Paraná. Disponível em: <http://www.iapar.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=863> . Acesso em: 01 mar. 2018.

DERBY, O. A. A região diamantífera do Estado do Paraná. Arch. Mus. Nac. Rio de Janeiro, 1878.

FRAGOSO-CESAR, A. R. S. Novas Considerações sobre o Ciclo Brasileiro. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia. 44, p. 28, 2008.

HEILBRON, M.; PEDROSA-SOARES, A.C.; CAMPOS NETO, M.; SILVA, L.C.; TROUW, R.A.J. & JANASI, V.C. 2004. A Província Mantiqueira: In MANTESSO-NETO, V., BARTORELLI, A., CARNEIRO, C.D.R. & BRITO NEVES, B.B. (Eds). O Desvendar de Um Continente: A Moderna Geologia da América do Sul e o Legado da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida, p. 203-234.

MAACK, R. Breves notícias sobre a geologia dos Estados do Paraná e Santa Catarina. Arq. de Biol. e Tec. 2, p. 63-154.

MARINI, O. J.; FUCK, R. A.; TREIN, E. O Grupo Açungui no Estado do Paraná. Boletim Paranaense de Geociências, Curitiba, 23 - 25, p. 43-100, 1967(a).

MARINI, O. J.; FUCK, R. A.; TREIN, E. Intrusivas Básicas Jurássico-Cretáceas do Primeiro Planalto do Paraná, Curitiba, n. 23 - 25, p. 307-323, 1967(b).

MOON, C. J.; WHATELEY, M. K. G.; EVANS, A. M. Introduction to mineral exploration. 2 ed. New Delhi: Blackwell Publishing, 2006, 481p.

OLIVEIRA, E. P. **Geologia e recursos minerais do Estado do Paraná**. 6.ed. Curitiba, 1927.

RAMPAZZO, G. J. **Determinação do teor médio e da incerteza em depósitos fosfáticos estratiformes no sul do estado do Mato Grosso**. 2017. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.

REVUELTA, M. B. Mineral resources. From exploration to sustainability assessment. 1 ed. Florida: Springer, 2017, 421p.

ROSSI, E. M.; DEUTSCH, C. V. Mineral resource estimation. 1 ed. Florida: Springer, 2014, 332p.

SEOANE, J. C. S. **Geologia do ouro epitermal de Castro, PR**. Uso de sistema de informação Geo-referenciada para a avaliação de base de dados geológico-geoquímico. 1999. Tese (Doutorado em geociências) – Instituto de Geociências, Universidade de Campinas, Campinas.

SERRANO, V. D. Mapeamento geológico e o contexto das mineralizações auríferas epitermais da Fazenda São Daniel, Região de Castro – PR. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2013.

SINCLAIR, A. J.; BLACKWELL, G. H. Applied mineral inventory estimation. New York: Cambridge, 2002, 381p.

TEIXEIRA, A.L.; GAUCHER, G.; PAIM, S.S.G.; FONSECA, M. M.; PARENTE, C. V. P.; SILVA FILHO, W. F.; ALMEIDA, A. R. Bacias do estágio da transição da Plataforma Sul-Americana. In: MANTESSO NETO, V., BARTORELLI, A., CARNEIRO, C.D.R., BRITO-NEVES, B.B. (Org.). Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. São Paulo: Beca, 2004. p.437-536.

TREIN E.; FUCK R.A. O Grupo Castro. Geologia do Pré-Devoniano e intrusivas Susequentes da Porção Oriental do Estado do Paraná. Bol. Par. de Geociênc. 23, 25, p. 257-305, 1967.

YAMAMOTO, J.K. An alternative measure of the reliability of ordinary kriging estimates. Mathematical Geology. 32, p. 337-340, 2000.

YAMAMOTO, J.K. ; MAO, X.M. ; KOIKE, K. ; CROSTA, A.P. ; LANDIM, P.M.B. ; HU, H.Z. ; WANG, C.Y. ; YAO, L.Q. . Mapping an uncertainty zone between interpolated types of a categorical variable. *Computers & Geosciences*. 40, p. 146-152, 2012.

YAMAMOTO, J.K.; LANDIM, P.M.B. *Geoestatística: Conceitos e Aplicações*. São Paulo: Oficina de Textos. 2013.