

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Escola de Engenharia
Curso de Especialização em Engenharia de Recursos Minerais

Mateus Filipe Andrade Brasil

DESAFIOS NA MODELAGEM GEOLÓGICA E ESTIMATIVA DE RECURSOS
NA PESQUISA MINERAL: estudo de caso para minério de ferro coluvionar na
Bahia, Brasil.

Belo Horizonte

2025

Mateus Filipe Andrade Brasil

**DESAFIOS NA MODELAGEM GEOLÓGICA E ESTIMATIVA DE RECURSOS
NA PESQUISA MINERAL: estudo de caso para minério de ferro coluvionar na
Bahia.**

Trabalho Final de Curso apresentado ao
Curso de Especialização em Engenharia
de Recursos Minerais da Universidade
Federal de Minas Gerais como requisito
parcial para a obtenção do título de
Especialista em Engenharia de Recursos
Minerais.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Benedito
Casagrande

Belo Horizonte

2025



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MINAS
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ENGENHARIA DE RECURSOS MINERAIS

**ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
MONOGRAFIA/ARTIGO**

Aos vinte e oito dias do mês de junho do ano de dois mil e vinte e cinco, às 10h:20 , o estudante Mateus Filipe Andrade Brasil, matrícula 2023700706, defendeu o Trabalho intitulado “**Desafios na Modelagem Geológica e Estimativa de Recursos na Pesquisa Mineral: estudo de caso para minério de ferro coluvionar na Bahia, Brasil**”.

Participaram da banca examinadora os professores abaixo indicados, que, por nada mais terem a declarar, assinam eletronicamente a presente ata.

Nota: 75

Situação: Aprovado

Orientador: Professor Pedro Benedito Casagrande

Examinador: Professor Pedro Henrique Alves Campos

Examinador: Professor Michel Melo Oliveira



Documento assinado eletronicamente por **Pedro Henrique Alves Campos, Professor do Magistério Superior**, em 15/12/2025, às 13:12, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Michel Melo Oliveira, Professor do Magistério Superior**, em 15/12/2025, às 17:37, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Pedro Benedito Casagrande, Subchefe de departamento**, em 17/12/2025, às 11:53, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

A autenticidade deste documento pode ser conferida no site



https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **4444932** e o código CRC **DDFEA583**.

INSTRUÇÕES

Este documento deve ser editado apenas pelo Orientador e deve ser assinado eletronicamente por todos os membros da banca.

Referência: Processo nº 23072.201794/2023-83

SEI nº 4444932

AGRADECIMENTOS

- À Prominas Mining, pelo fornecimento da licença de uso do HxGN MinePlan®, suporte técnico e conhecimentos compartilhados ao longo de todo curso de especialização.

RESUMO

A modelagem geológica é fundamental em diversas etapas da cadeia de produção mineral, sendo o modelo preliminar construído após a primeira fase de pesquisa mineral crucial para avaliação da continuidade do projeto. Nesse contexto, o modelo deve ser bem trabalhado, apesar da escassez de dados, de modo a gerar a melhor classificação de recursos possível. Este trabalho apresenta um estudo de caso sobre os desafios na modelagem geológica e na estimativa de recursos minerais em um depósito de minério de ferro coluvionar na Bahia (Brasil). O intuito é apresentar, num passo-a-passo lógico, as etapas de elaboração de um modelo geológico simples, apontar as dificuldades no processo e discutir maneiras de contornar os problemas intrínsecos a projetos com investigações realizadas por diferentes métodos e profissionais. O trabalho é feito com o suporte do software especializado *HxGN MinePlan*® e integra dados de sondagem, poços e trincheiras, bem como perfis geofísicos de resistividade.

Palavras-chave: *modelagem geológica; classificação de recursos minerais; pesquisa mineral; MinePlan.*

ABSTRACT

Geological modeling plays a fundamental role in various stages of the mineral production chain, with the preliminary model developed after the initial phase of mineral exploration being critical for project continuity assessment. This study presents a case study addressing the challenges of geological modeling and mineral resource estimation in a colluvial iron ore deposit located in Bahia, Brazil. The objective is to outline, through a logical and systematic approach, the main steps involved in constructing a simple geological model, highlighting the difficulties commonly encountered and discussing strategies to address issues arising from datasets acquired through different methods and by various professionals. The modeling process was supported by the specialized software HxGN MinePlan®, integrating data from drilling, pits, trenches and geo-electrical resistivity profiles.

Keywords: *geological modeling; mineral resources classification; mineral exploration; MinePlan.*

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Relação entre ocorrências minerais (retirado de IBRAM, 2018). | 8 |
| Figura 2 - Esquema de definições padrão do Guia CBRR para recursos e reservas (extraído do Guia CBRR de 2022). | 9 |
| Figura 3 - (A) Descrição de testemunhos de sondagem em campo; (B) Poço aberto para investigação da espessura do minério coluvionar. | 11 |
| Figura 4 - Visualização das inconsistências no posicionamento dos dados no espaço (plotados no HxGn MinePlan) | 12 |
| Figura 5 - Exemplo de planilha tratada e padronizada. | 14 |
| Figura 6 - Banco de dados estruturado em correspondência às planilhas de descrições tratadas. | 14 |
| Figura 7 - Exemplo de perfil geoeletrico de resistividade, exportado como imagem, com as devidas interpretações. | 15 |
| Figura 8 - Importação dos perfis geoeletricos de resistividade para o MinePlan, com o devido posicionamento e dimensionamento. | 16 |
| Figura 9 - Resistividade de rochas, solos e minerais (LOKE, 2025). | 17 |
| Figura 10 - Traçado dos domínios interpretados, seção a seção (azul: topografia; rosa: minério coluvionar; verde: correspondência com afloramentos descritos em campo; amarelo: colúvio de arenito não mineralizado). | 17 |
| Figura 11 - Comparação entre o MDE da SRTM, em bege, com a superfície topográfica interpolada a partir dos perfis geoeletricos, em azul. | 18 |
| Figura 12 - Elipsoide do trend geológico, seções interpretadas e dados de campo reunidos como suporte para a modelagem geológica. | 19 |
| Figura 13 - Modelo geológico preliminar da etapa de pesquisa mineral (vermelho: minério de ferro coluvionar; marrom: encaixante/estéril; tracejado: topografia). | 20 |
| Figura 14 - Aferição de volume e tonelagem do sólido de minério direto na interface do MinePlan. | 21 |

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relação de categorias em cada atributo do banco de dados de modelagem 13

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| 1. INTRODUÇÃO | 7 |
| 2. OBJETIVOS..... | 10 |
| 3. DESENVOLVIMENTO | 11 |
| 3.1 Contextualização e problemática | 11 |
| 3.2 Metodologia empregada e resultados | 13 |
| 3.2.1 Banco de dados | 13 |
| 3.2.2 Georreferenciamento de perfis geoelétricos de resistividade | 15 |
| 3.2.3 Separação de domínios | 16 |
| 3.2.4 Interpolação da topografia..... | 18 |
| 3.2.5 Construção do modelo geológico | 19 |
| 3.2.6 Cálculo do recurso mineral..... | 20 |
| 3.2.7 Classificação do recurso mineral | 21 |
| 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 22 |
| REFERÊNCIAS | 23 |

1. INTRODUÇÃO

A Comissão Brasileira de Recursos e Reservas (CBRR), define no Guia CBRR para Declaração de Informações de Exploração, Recursos Minerais e Reservas Minerais (2022) que:

Um Recurso Mineral é uma concentração ou ocorrência de material sólido de interesse econômico na ou sobre a crosta terrestre de tal forma, teor ou qualidade e quantidade que haja perspectivas razoáveis para uma eventual extração econômica. A localização, quantidade, teor ou qualidade, continuidade e outras características geológicas de um Recurso Mineral são conhecidas, estimadas ou interpretadas a partir de evidências e conhecimento geológico específico, incluindo amostragem. Os Recursos Minerais são subdivididos, em ordem de aumento de confiança geológica, em Recurso Mineral Inferido, Recurso Mineral Indicado e Recurso Mineral Medido.

Nesse contexto, fica claro que é necessário representar os corpos minerais de modo que sua distribuição espacial fique clara, seja por meio de seções bidimensionais ou representações tridimensionais (FERREIRA, 2006). Neste trabalho, como de praxe na indústria, utiliza-se um *software* especializado para construir e visualizar tais corpos por meio de sólidos virtuais 3D. O conjunto dos sólidos representativos das litologias de interesse e circunvizinhas é denominado modelo geológico.

A modelagem geológica é uma etapa crucial da estimativa e classificação de recursos minerais, uma vez que o modelo compila as informações adquiridas durante a pesquisa mineral e as interpretações dos dados (LONGO, 2023). Um modelo geológico preliminar materializa o que se infere sobre a distribuição espacial de um corpo mineral e seu volume, o que é essencial para o avanço dos estudos de viabilidade econômica de um depósito ou mesmo o abandono da pesquisa naquela área.

A qualidade do modelo geológico depende diretamente da qualidade e abundância dos dados adquiridos em campo ou via sensoriamento remoto, bem como da interpretação dada pelo geomodelador. Para construir o modelo, necessita-se de informações como topografia, testemunhos de sondagem, mapas geológicos, etc (GUEDES *et al.*, 2022). Esses dados podem ser integrados, comumente via *software* especializado, e permitem ao geomodelador a interpretação de seções para a modelagem explícita (ROLO, 2021) e/ou a escolha dos melhores interpoladores para a modelagem implícita.

A relação dos dados adquiridos com a qualidade do modelo geológico fica óbvia ao perceber que a continuidade lateral dos corpos em subsuperfície pode ser interpretada a partir dos furos de sondagem, levantamentos geofísicos, abertura de trincheiras e poços,

etc (SAD & VALENTE, 2007). Além disso, um bom levantamento topográfico resulta numa superfície detalhada que limita os corpos minerais superiormente, o que é fundamental para cálculos de volume acurados. Dessa forma, quedas na resolução espacial dos dados, bem como erros de aquisição, se propagam para o modelo geológico.

Segundo dados do Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM, 2018), a cada 1000 anomalias minerais, somente uma vem a se tornar uma mina (Figura 1). Diante de tal cenário, a pesquisa mineral pede cautela quanto aos investimentos e comumente executa o mínimo necessário para realizar uma avaliação econômica preliminar. A baixa disponibilidade de informações, portanto, impacta na qualidade do modelo geológico, o que se justifica devido ao custo. Conforme aumenta a razoável perspectiva de extração econômica, justificam-se novos gastos e, conseqüentemente, ajustes ao modelo.



Figura 1 - Relação entre ocorrências minerais (retirado de IBRAM, 2018).

Neste contexto, cabe a apresentação do esquema de definições de recursos e reservas minerais, dado pelo Guia CBRR Para Declaração de Informações de Exploração, Recursos Minerais e Reservas Minerais (2022), ilustrado na Figura 2. Tais definições são cruciais para a apresentação dos resultados da Pesquisa Mineral, e relacionam os recursos minerais à confiabilidade do conhecimento geológico envolvido em sua definição; enquanto as reservas sofrem a ponderação de fatores relacionados à viabilidade técnica e econômica de lavrar determinado material. Depreende-se, portanto, que apesar de um local poder ser abundante em recursos medidos – de alta confiabilidade geológica – isto não significa que todo este volume, ou parte, será convertido em reservas minerais.

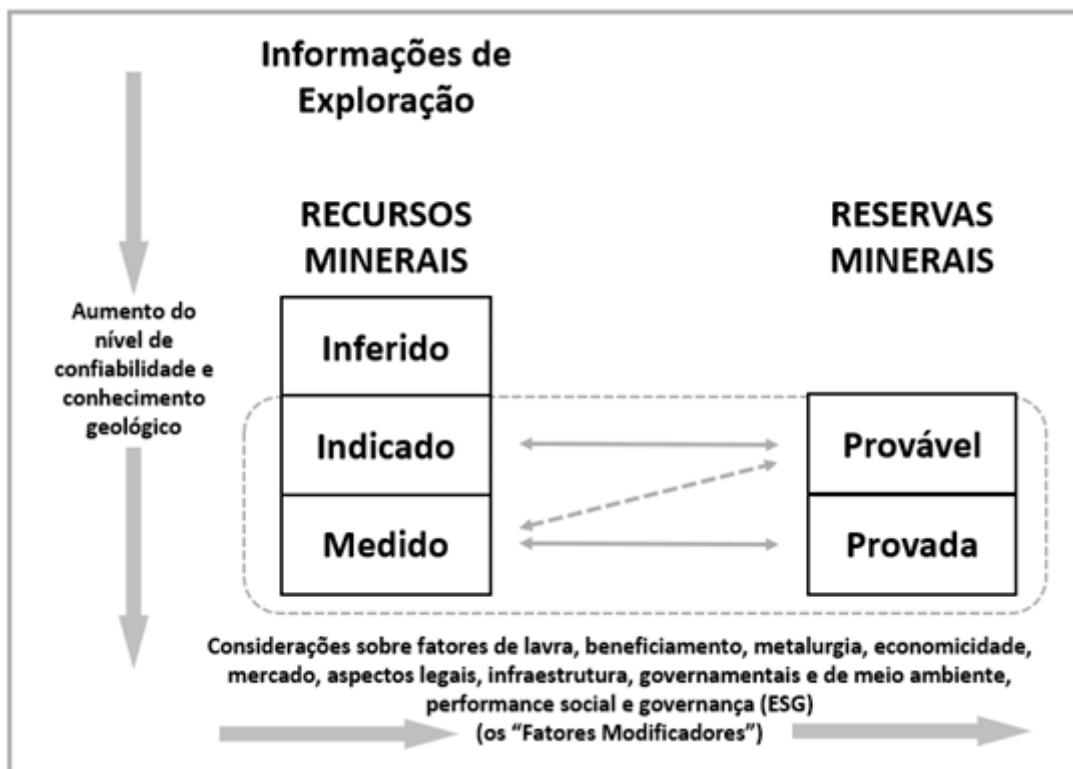


Figura 2 - Esquema de definições padrão do Guia CBRR para recursos e reservas (extraído do Guia CBRR de 2022).

Finalmente, neste trabalho apresenta-se um estudo de caso de modelagem geológica preliminar para a pesquisa mineral de um depósito de ferro coluvionar na Bahia. A problemática se estabelece a partir da escassez de informações e incompatibilidade entre dados adquiridos por diferentes métodos, e a necessidade de se estimar os recursos minerais na área com o mínimo de confiabilidade e sem novos investimentos em investigações de campo.

A localização do depósito, código do processo minerário e nome da empresa titular do direito serão omitidos com o intuito de não enviesar quaisquer relações comerciais.

2. OBJETIVOS

Este trabalho, através de um estudo de caso, busca:

- elaborar um modelo geológico para um corpo de minério de ferro coluvionar;
- estabelecer os principais passos de compilação e interpretação de dados necessários para a construção de um modelo geológico preliminar de uma área de pesquisa;
- apontar incompatibilidades comuns entre os dados adquiridos, e;
- discutir maneiras de contornar as incompatibilidades para gerar um modelo geológico aceitável e defensável.

3. DESENVOLVIMENTO

3.1 Contextualização e problemática

Foram realizados trabalhos de pesquisa mineral, por terceiros, em área de aproximadamente 20,0 km² no estado da Bahia (Brasil), com o intuito de averiguar o potencial econômico de uma mineralização de ferro coluvionar. Os trabalhos consistiram em revisão bibliográfica, mapeamento geológico de detalhe, sondagem diamantada, abertura de poços e trincheiras, caminhamentos geolétricos de resistividade, amostragem e análises físico-químicas do material coletado. Algumas etapas da aquisição de dados podem ser conferidas na **Figura 3**.



Figura 3 - (A) Descrição de testemunhos de sondagem em campo; (B) Poço aberto para investigação da espessura do minério coluvionar.

Para sustentar a construção de um modelo geológico para o minério e estimar seu volume, reuniu-se dados de 06 furos de sondagem, 07 perfis geolétricos de resistividade, 06 trincheiras e 47 poços abertos com retroescavadeira, todos adquiridos em campo. Além disso, uniu-se ao Modelo Digital de Elevação (MDE) obtido pela Missão Topográfica de Radar Embarcado (*Shuttle Radar Topography Mission – SRTM*), na falta de um levantamento mais preciso.

Todos os dados foram plotados no pacote de *softwares HxGN MinePlan*¹ e visualizados em conjunto para suportar a interpretação de seções e busca de continuidade lateral dos corpos minerais. Porém, a plotagem imediatamente revelou inconsistências posicionais entre os conjuntos de dados, no que se refere a cota e superfície topográfica de referência: a boca dos furos de sondagem não coincidiam com o MDE; os poços estavam quase todos abaixo da topografia; as trincheiras estavam todas acima da topografia; etc. Tais inconsistências podem ser observadas na **Figura 4**. Além disso, as descrições litológicas dos testemunhos, trincheiras e poços, sujeitas à subjetividade de cada profissional, apresentavam termos diversos para descrever os mesmos litotipos.

As inconsistências qualitativas entre as descrições e quantitativas nas posições impossibilitam a construção de um modelo geológico por meio da interpolação, uma vez que qualquer interpretação de continuidade lateral de um corpo mineral e raio de influência de algum dado, objetivamente estaria errada. Dessa forma, procedeu-se à padronização das descrições, bem como adoção de um único referencial posicional para a modelagem.

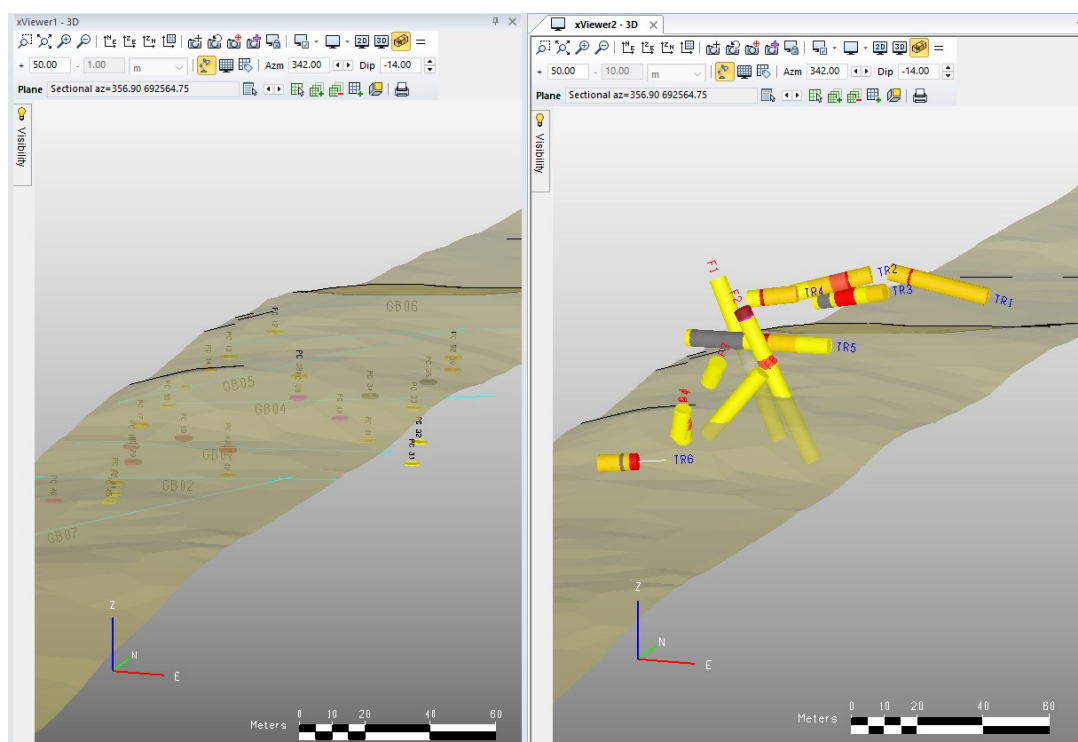


Figura 4 - Visualização das inconsistências no posicionamento dos dados no espaço (plotados no *HxGn MinePlan*)

¹ O *HxGN MinePlan*[®] é um pacote de *software* proprietário, especializado, pertencente à *Hexagon AB*, que oferece soluções integradas para modelagem geológica, estimativa de recursos, otimização de cavas, planejamento de lavra, entre outras atividades correlatas.

3.2 Metodologia empregada e resultados

3.2.1 Banco de dados

As descrições geológicas dos testemunhos de sondagem, dos poços e das trincheiras foram comparadas em busca de estabelecer padrões e agrupar litotipos durante a modelagem. Após cuidadosa análise, foram definidas categorias para cada atributo passível de ser modelado, como pode ser visto na **Tabela 1** e as descrições originais foram transcritas em planilhas com as devidas adaptações, sendo uma coluna para cada atributo. Para fins de compatibilidade entre idiomas e sistemas, todos os caracteres especiais foram removidos via *script* próprio, e as vírgulas foram substituídas por pontos. O resultado do tratamento das planilhas é ilustrado pela **Figura 5**.

Após as transcrições, configurou-se um banco de dados no *MinePlan* (**Figura 6**), onde as planilhas foram importadas com correspondência entre atributos e categorias, pois um banco de dados padronizado e coeso é fundamental para a posterior visualização e modelagem de dados.

Tabela 1 - Relação de categorias em cada atributo do banco de dados de modelagem

| Atributo | Categoria |
|-----------|---|
| Litologia | Arenito Arenito Oxidado Ferro Hematitito Quartzito Quartzito Brecha Saprolito Saprolito Oxidado Sedimento Solo |
| Minério | Estéril Minério Disseminado (MD) Minério Maciço (MM) Minério Muito Disseminado (MMD) |
| Estrutura | Brecha Falha Fratura Sn Veio de Quartzo (VQZ) Zona de Cisalhamento (ZC) |
| Hematita | Ausente Presente |

| Sample Site Name | From | To | LITOM | Coeso | Cor | Hematita | Minerio | Descricao |
|------------------|-------|-------|------------|--------------------|--------------------------|----------|---------|---|
| F1 | 0 | 5.08 | Arenito | Area solta | Branco/Bege | Ausente | Esteril | Fracao de areia fina com grãos sub arredondados. Raros grãos oxidados, prevalecendo grãos de quartzo hialinos bem selt |
| F1 | 5.08 | 7.50 | Arenito | Area solta | Branco/Bege | Ausente | Esteril | Pacote similar ao anterior: poreo fraco de areia media com grãos sub arredondados. Muita sericita no pacote. |
| F1 | 7.50 | 8 | Arenito | Muito friavel | Marrom/alaranjado | Ausente | Esteril | Coloracao mais escura mas sem presenca de oxidos de ferro. Camada com diferente granulometria (media) e selecionam |
| F1 | 8 | 11.60 | Arenito | Friavel | Branco/Bege | Ausente | Esteril | Fracao de areia fina com grãos sub arredondados. Raros grãos oxidados, prevalecendo grãos de quartzo hialinos bem selt |
| F1 | 13.60 | 19.70 | Arenito | Coeso | Branco/Bege | Ausente | Esteril | Idem. Todos os planos de falhas e fraturas com presenca de sericita |
| F1 | 19.70 | 23.70 | Arenito | Coeso | Rosado | Ausente | Esteril | Idem. Todos os planos de falhas e fraturas com presenca de sericita. Coloracao rosada sem relevancia |
| F1 | 23.70 | 26.95 | QZ Brechia | Coeso | Branco | Ausente | Esteril | Pacote brechado de quartzo. Rocha muito fragmentada intercalada com finas camadas de areia grossa [provavelmente ass |
| F1 | 26.95 | 29.20 | Quartzito | Coeso | Branco | Ausente | Esteril | Pacote com menor incidencia de zonas de brechas. Intercalacoes com pequenas camadas de arenito friavel. Presenca de fra |
| F1 | 29.20 | 32.35 | Arenito | Coeso | Begal/Rosado | Ausente | Esteril | Pacote de arenito levemente oxidado (rosado) com presenca constante de sistemas de fraturamento. Maior parte das estru |
| F2 | 0 | 2.95 | Solo | Naoo coeso | Vermelho escuro | Presente | MMD | Presenca de materia organica/Material argiloso com fragmentos milimetricos de hematita |
| F2 | 2.65 | 3.15 | Saprolito | Naoo coeso | Vermelho escuro | Presente | MMD | Material argiloso com fragmentos milimetricos de hematita |
| F2 | 3.15 | 4.35 | Arenito | Muito friavel | cinza a avermelhad | Presente | Esteril | Hematita na matriz em quantidade irrelevante |
| F2 | 4.35 | 11.15 | Arenito | Muito Friavel | Cinza | Presente | Esteril | Hematita na matriz de forma geral e em maior concentracao em raros pacotes conformicos, as quais tambem apresenta |
| F2 | 11.15 | 13.60 | Arenito | Friavel | Cinza avermelhado | Presente | MD | Camadas de hematito de ate 2cm de espessura em meio o arenito oxidado Presenca de hematita em quantidade relevante e |
| F2 | 13.60 | 15.26 | Arenito | Friavel | Cinza | Presente | Esteril | Hematita em quantidade irrelevante na matriz |
| F2 | 15.26 | 16.60 | Arenito | Muito friavel | cinza a avermelhad | Presente | MD | Camadas de hematito de ate 3cm de espessura. foliadas e com aumento de frequencia a medida que se aproxima do macio |
| F2 | 16.60 | 19.60 | Hematitito | Macio | Pardo/Cinza escuro | Presente | MMC | Camada foliada de hematito. baixa recuperacao da manobra, indicando intercalacao com zonas menos macias no pacote |
| F2 | 19.60 | 20.95 | Arenito | Muito friavel | cinza a avermelhad | Presente | MD | Presenca de fragmentos de hematito em todo o pacote, predominando lamarinhos de 0.2cm e raros de 0.5cm Presenca de he |
| F2 | 20.95 | 28.60 | Arenito | Friavel a coeso | cinza a avermelhad | Presente | Esteril | Presenca de hematita em pequena quantidade na matriz e em raros planos de fraturas, se tornando irrelevante no pacote |
| F2 | 28.60 | 29.80 | Arenito | Coeso | cinza a vermelho escu | Presente | MMD | Pacote com aumento da presenca de hematita na matriz e nos planos de fraturaPredomina presenca de camadas milimetric |
| F2 | 29.80 | 43.50 | Arenito | Coeso | cinza a vermelho escu | Presente | Esteril | Presenca de hematita na matriz de forma irrelevante com raras camadas de hematito de no max 1cmPoucas algumas falha |
| F2 | 43.50 | 51.90 | Arenito | Coeso | cinza a vermelho escu | Presente | MMD | Maior frequencia de estruturas com hematita associada, dando caracteristica de coloracao mais escura e maior densidade |
| F3 | 0 | 1 | Arenito | Naoo coeso | Cinza a oxidado | Presente | MMD | Pacote com presenca de raros fragmentos de hematita entre 1 e 2mmPresenca de hematita na matriz de forma irrelevante |
| F3 | 1 | 4.95 | Arenito | Naoo coeso | Cinza | Ausente | Esteril | Arenito fino muito friavel |
| F3 | 4.95 | 6.65 | Arenito | Naoo coeso | cinza a amarronzad | Presente | MMD | Pacote com presenca de sericita (aumento da quantidade em profundidade), caracteristica tipica dos arenitos rosados com s |
| F3 | 6.65 | 6.45 | Arenito | Naoo coeso | Cinza | Ausente | Esteril | Pacote similar ao anterior/intercalacao com faixa alaranjada (arenito grosso de natureza diferente) |
| F3 | 6.45 | 7.10 | Arenito | Naoo coeso/Friavel | Bege | Ausente | Esteril | Pacote com mudanca gradacional de coloracao e coeso (cinza para bege e nao coeso para coeso) |
| F3 | 7.10 | 9.05 | Arenito | Coeso | Bege | Ausente | Esteril | Arenito bege com sericita nos planos de fraturas |
| F4 | 0 | 3.55 | Arenito | Naoo coeso | cinza escuro a oxidad | Presente | MMD | Presenca de hematita na matriz mas ausencia de fragmentos indicativos de camadas de hematito no pacote |
| F4 | 3.55 | 4.65 | Arenito | Friavel | cinza escuro a oxidad | Presente | MMD | Presenca de hematita na matriz e de pequenas camadasde hematito milimetricas espessadas no pacote |
| F4 | 4.65 | 7.20 | Arenito | Friavel | cinza escuro a oxidad | Presente | MD | Presenca de hematita em todo o pacote, predominando fragmentos de 0.3 a 0.5cm mas com fragmentos de ate 1cm OBS: Mat |
| F4 | 7.20 | 8.20 | Arenito | Friavel | Cinza claro | Ausente | Esteril | Presenca de sericita na matriz e oxidacao nos planos de fratura |
| F4 | 8.20 | 9.90 | Arenito | Friavel/Coeso | Branco/Branco | Ausente | Esteril | Arenito similar ao pacote do leste da area, coloracao rosada com sericita na matriz e nos planos de fraturas |
| F5 | 0 | 2.40 | Arenito | Naoo coeso | cinza escuro a oxidad | Presente | Esteril | Pacote com falhas mais oxidadas intercaladasPresenca de hematita apenas disseminada na matriz, em quantidade irrelev |
| F5 | 2.40 | 4.70 | Arenito | Naoo coeso | cinza escuro a muito oxi | Presente | MMD | Pacote similar ao anterior, poreo com presenca de fragmentos espacosos de hematito de no maximo 3mm |
| F5 | 4.70 | 4.70 | Naoo coeso | Friavel | Cinza escuro | Presente | MT | Pacote homogeneo com grande quantidade e frequencia de fragmentos de hematito de ate 3cm, mas nao disseminado entre 0 |

Figura 5 - Exemplo de planilha tratada e padronizada.

| Name | Intervals | Actual Length | Actual East (Q) | Actual North (Q) | Actual Elev (Q) | Unit | Coordinate System | Area | Interval Type | Drillhole Type | Date | Comento |
|-------|-----------|---------------|-----------------|------------------|-----------------|------|-------------------|------|---------------|----------------|------|---------|
| F1 | 9 | 52.10 | | | | | | | | | | |
| F2 | 13 | 51.90 | | | | | | | | | | |
| F3 | 6 | 6.65 | | | | | | | | | | |
| F4 | 1 | 9.90 | | | | | | | | | | |
| F5 | 7 | 12.70 | | | | | | | | | | |
| F6 | 10 | 27.25 | | | | | | | | | | |
| PC 1 | 1 | 1.00 | | | | | | | | | | |
| PC 2 | 1 | 0.40 | | | | | | | | | | |
| PC 3 | 1 | 0.60 | | | | | | | | | | |
| PC 4 | 1 | 0.15 | | | | | | | | | | |
| PC 5 | 1 | 0.15 | | | | | | | | | | |
| PC 6 | 1 | 0.30 | | | | | | | | | | |
| PC 7 | 1 | 0.60 | | | | | | | | | | |
| PC 8 | 1 | 0.45 | | | | | | | | | | |
| PC 9 | 1 | 0.90 | | | | | | | | | | |
| PC 10 | 1 | 1.10 | | | | | | | | | | |
| PC 11 | 1 | 0.60 | | | | | | | | | | |
| PC 12 | 1 | 0.20 | | | | | | | | | | |
| PC 13 | 1 | 0.35 | | | | | | | | | | |
| PC 14 | 1 | 0.40 | | | | | | | | | | |
| PC 15 | 1 | 0.30 | | | | | | | | | | |
| PC 16 | 1 | 0.40 | | | | | | | | | | |
| PC 17 | 1 | 0.70 | | | | | | | | | | |
| PC 18 | 1 | 0.60 | | | | | | | | | | |
| PC 19 | 1 | 0.60 | | | | | | | | | | |
| PC 20 | 1 | 0.50 | | | | | | | | | | |
| PC 21 | 1 | 0.50 | | | | | | | | | | |
| PC 22 | 1 | 0.50 | | | | | | | | | | |
| PC 23 | 1 | 0.90 | | | | | | | | | | |
| PC 24 | 1 | 0.80 | | | | | | | | | | |
| PC 25 | 1 | 0.80 | | | | | | | | | | |
| PC 26 | 1 | 1.30 | | | | | | | | | | |
| PC 27 | 1 | 0.30 | | | | | | | | | | |
| PC 28 | 1 | 0.90 | | | | | | | | | | |
| PC 29 | 1 | 0.60 | | | | | | | | | | |
| PC 29 | 1 | 1.10 | | | | | | | | | | |

Figura 6 - Banco de dados estruturado em correspondência às planilhas de descrições tratadas.

3.2.2 Georreferenciamento de perfis geoeletricos de resistividade

Com o banco de dados ajustado, procedeu-se à importação dos perfis geoeletricos de resistividade. Dada a impossibilidade de importá-los diretamente do *software* de origem, optou-se por sua conversão em imagens e importação através de georreferenciamento. Um exemplo de perfil geoeletrico está ilustrado na **Figura 7**.

O processo de georreferenciamento é simples: cada perfil é trazido ao *software* e tem pelo menos três pontos na imagem associados às suas coordenadas reais. As coordenadas X, Y e Z do início e do fim do caminhamento compõem os metadados do perfil geoeletrico, enquanto as profundidades podem ser vistas em escala gráfica nas respectivas imagens.

O resultado do processo é uma imagem posicionada e dimensionada corretamente no espaço virtual do *software*, representando acuradamente a posição dos dados no mundo real. Dessa forma, obteve-se 07 superficies verticais estampadas pelos perfis como ilustrado na **Figura 8** **Figura 7**.

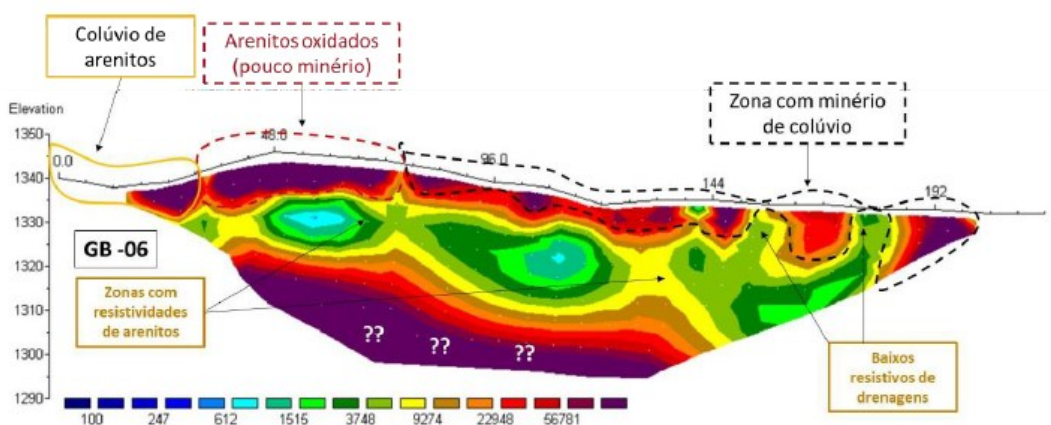


Figura 7 - Exemplo de perfil geoeletrico de resistividade, exportado como imagem, com as devidas interpretações.

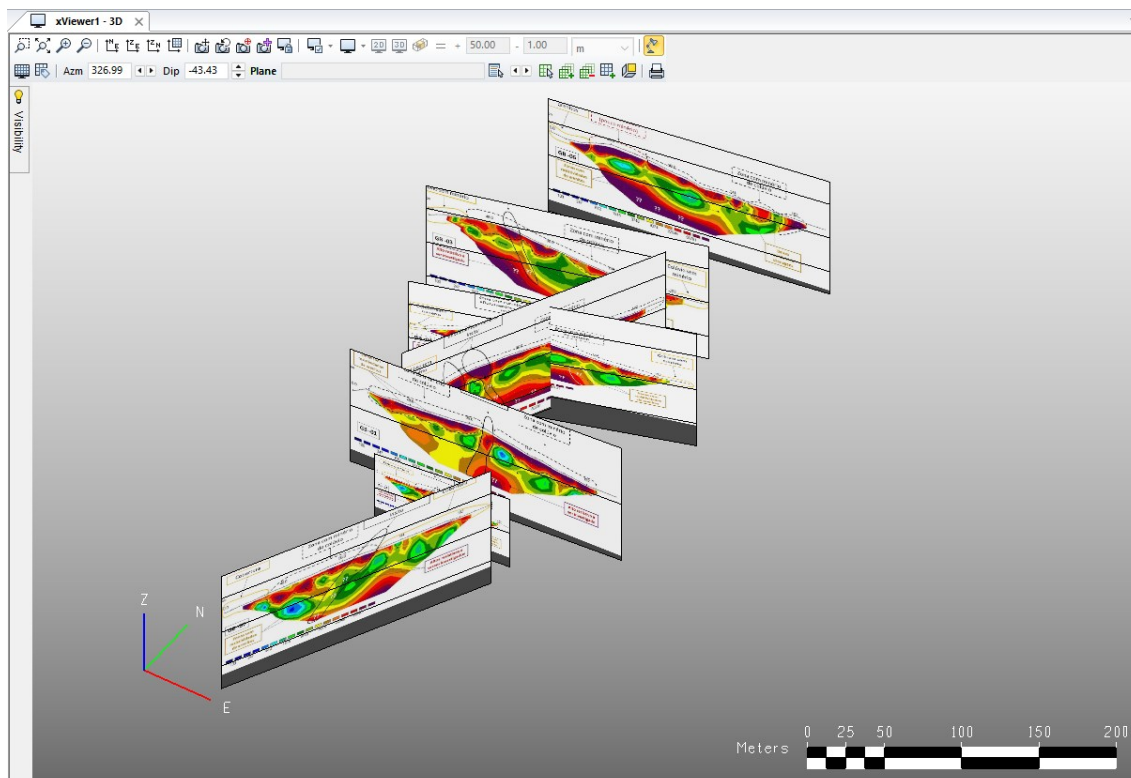


Figura 8 - Importação dos perfis geoeétricos de resistividade para o MinePlan, com o devido posicionamento e dimensionamento.

3.2.3 Separação de domínios

A resistividade diz respeito à oposição dos materiais à passagem de corrente elétrica (KEAREY, 2009), dessa forma cada material litológico apresenta diferente resistividade devido a mudanças na sua composição química, mineralogia, porosidade, etc. A **Figura 9** apresenta as faixas de resistividade para diferentes litotipos, e é com base nesse conceito que se procedeu a análise dos perfis geoeétricos. Os contrastes nas leituras de resistividade e a correlação às descrições de campo permitiram a delimitação de diferentes domínios. Sendo assim, foram desenhados linhas e polígonos diretamente sobre as superfícies, de modo a formar seções interpretadas para guiar a modelagem geológica.

Traçou-se a interseção dos perfis com a topografia; e os polígonos dos domínios de colúvios de arenitos, colúvios de minério, arenitos oxidados de transição, e zonas de minério *in situ*. Os polígonos e linhas desenhados virtualmente podem ser conferidos na **Figura 10**.

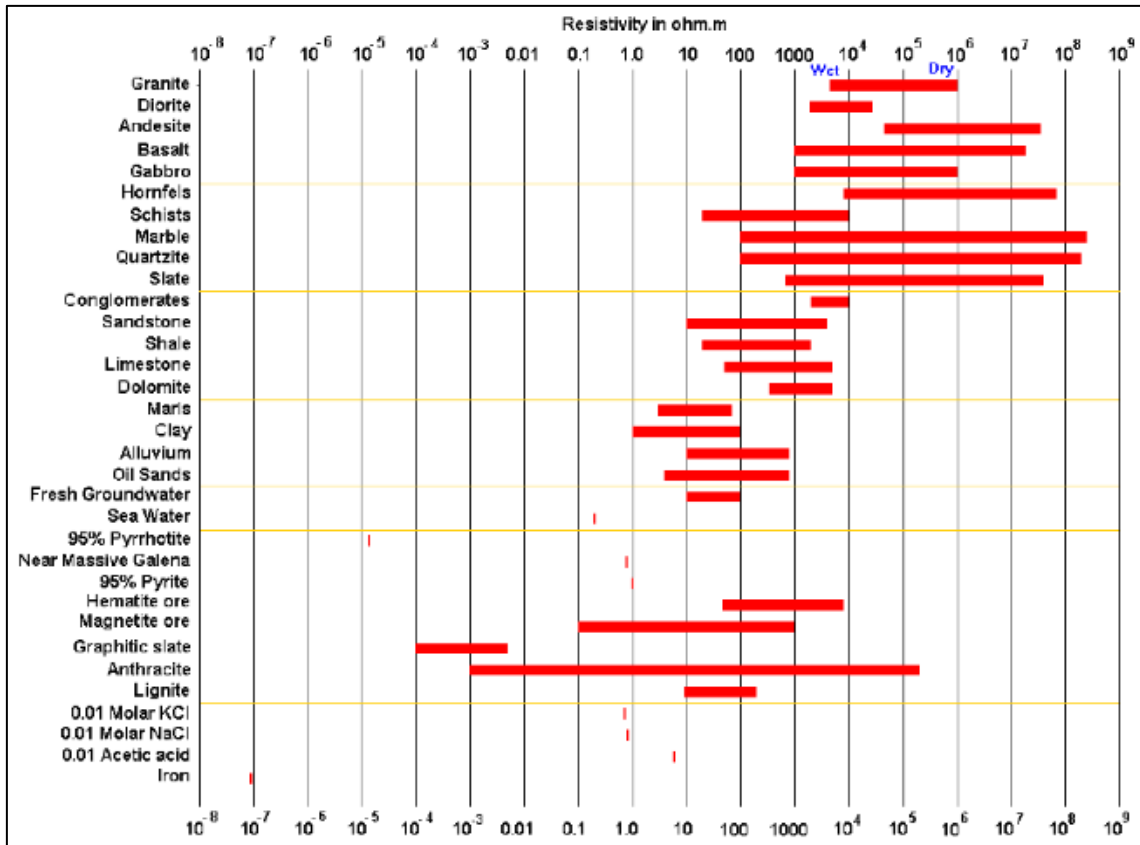


Figura 9 - Resistividade de rochas, solos e minerais (LOKE, 2025)

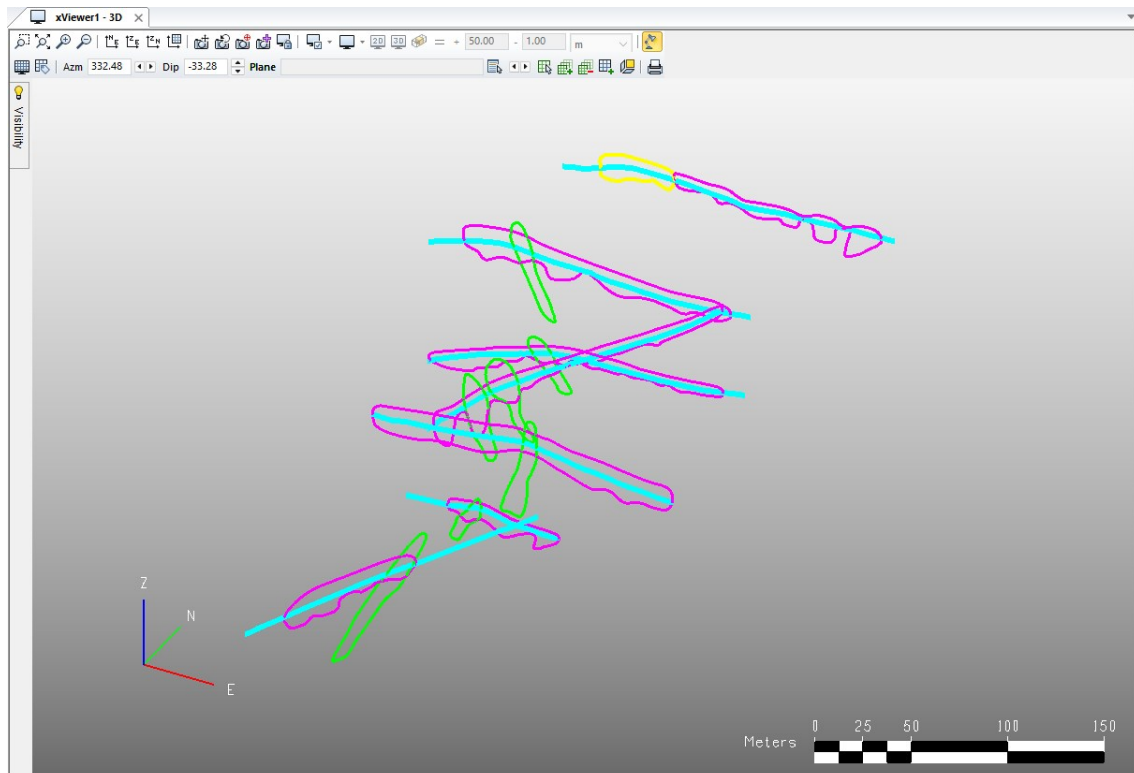


Figura 10 - Traçado dos domínios interpretados, seção a seção (azul: topografia; rosa: minério colunar; verde: correspondência com afloramentos descritos em campo; amarelo: colúvio de arenito não mineralizado).

3.2.4 Interpolação da topografia

A primeira interpolação realizada foi a de uma nova superfície topográfica a partir dos perfis geolétricos. Suas linhas de topo foram unidas através de ferramentas de modelagem implícita, garantindo que as regiões interpoladas mantivessem a tendência dos arredores.

Os dados de elevação dos perfis geolétricos foram considerados padrão, uma vez que foram obtidos por caminhamentos em superfície. A escolha se deu pelos seguintes fatores:

- os dados estão amarrados entre si;
- há ampla distribuição espacial na área do projeto;
- a aquisição é mais recente do que o MDE da SRTM.

Com a nova topografia definida, foi possível ajustar as posições dos furos de sondagem, trincheiras e poços. Isto foi considerado adequado, uma vez que as medidas de profundidade estão corretas e somente a sua elevação destoava. A comparação entre a superfície interpolada e o MDE da SRTM, bem como suas interseções com um dos perfis geolétricos pode ser vista na **Figura 11**.

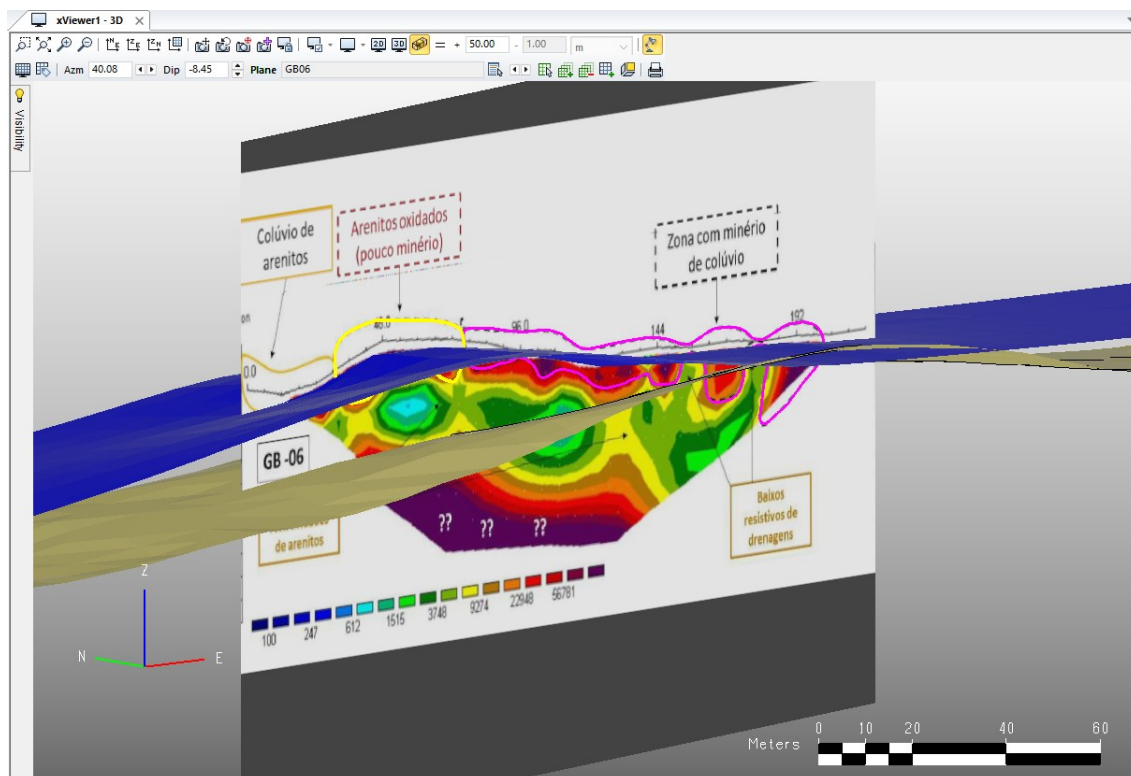


Figura 11 - Comparação entre o MDE da SRTM, em bege, com a superfície topográfica interpolada a partir dos perfis geolétricos, em azul.

3.2.5 Construção do modelo geológico

Uma vez com todos os dados ajustados e padronizados, procedeu-se à modelagem geológica. Neste caso, a interpretação de seções, através do desenho de polígonos para os domínios litológicos sobre cada perfil geoelectrico, caracteriza uma etapa da modelagem explícita. Porém, a ligação entre as seções foi feita com técnicas de modelagem implícita.

O *MinePlan* permite o uso concomitante dos dados geométricos interpretados e do banco de dados de sondagem, trincheiras e poços. Dessa forma, foi possível direcionar os interpoladores para honrar as seções e estabelecer um elipsoide representativo do *trend* geológico dos dados e forçar a continuidade lateral dos litotipos. Após diversos testes e ajustes, chegou-se a um elipsoide de orientação Az 174° e Dip 5° E. As dimensões dos eixos foram exageradas na proporção de 5:2,5:1 para que não houvesse artefatos introduzidos pelo algoritmo. A relação entre o elipsoide e os dados interpolados pode ser vista na **Figura 12**.

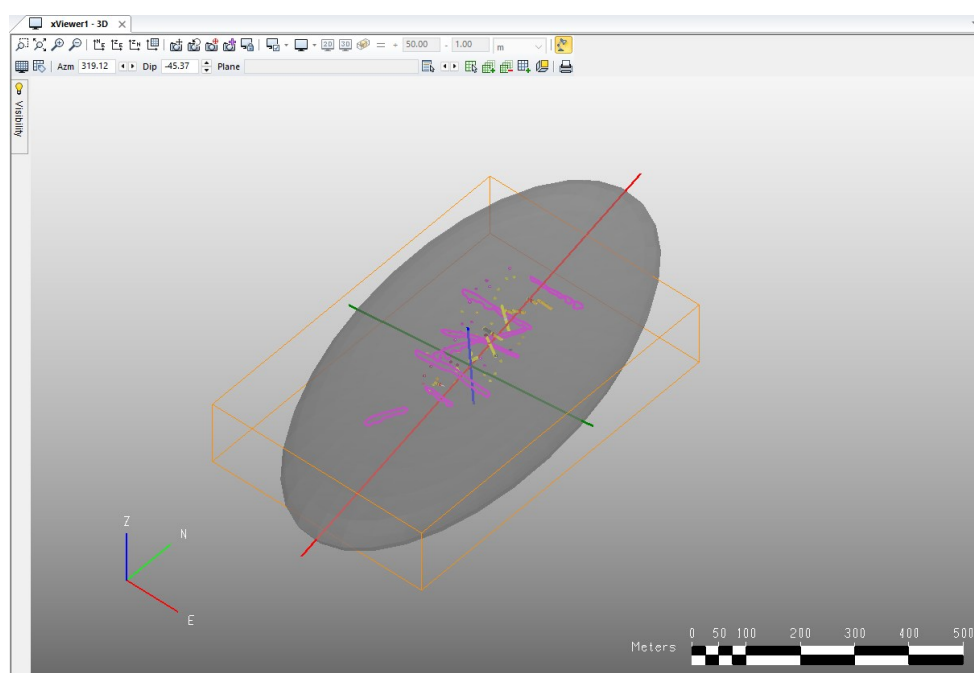


Figura 12 - Elipsoide do trend geológico, seções interpretadas e dados de campo reunidos como suporte para a modelagem geológica.

Finalmente, obteve-se um modelo geológico condizente com as adaptações e interpretações propostas. Considerou-se um só litotipo de minério, agrupado como minério coluvionar, e um só litotipo de estéril, resultando em dois sólidos virtuais e uma superfície topográfica no modelo final, como ilustrado na **Figura 13**.

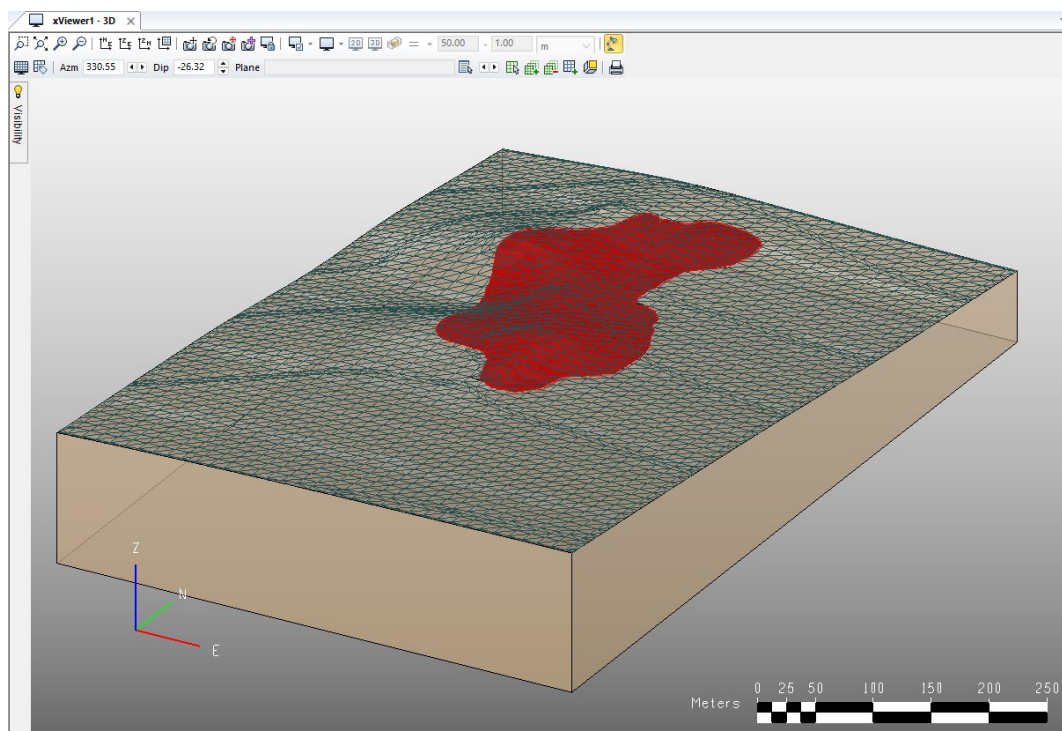


Figura 13 - Modelo geológico preliminar da etapa de pesquisa mineral (vermelho: minério de ferro coluvionar; marrom: encaixante/estéril; tracejado: topografia).

3.2.6 Cálculo do recurso mineral

Com o modelo pronto, resta aferir seu volume e calcular a massa total. O volume é calculado pelo software através do determinante de uma matriz tridimensional e resulta em 300.418,69 m³ (**Figura 14**), já a densidade obtida por picnometria em laboratório é de 3,24 t/m³. Dessa forma, por meio da equação 1, obtém-se uma massa total de minério de aproximadamente 973.356,57 toneladas.

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (\text{equação 1})$$

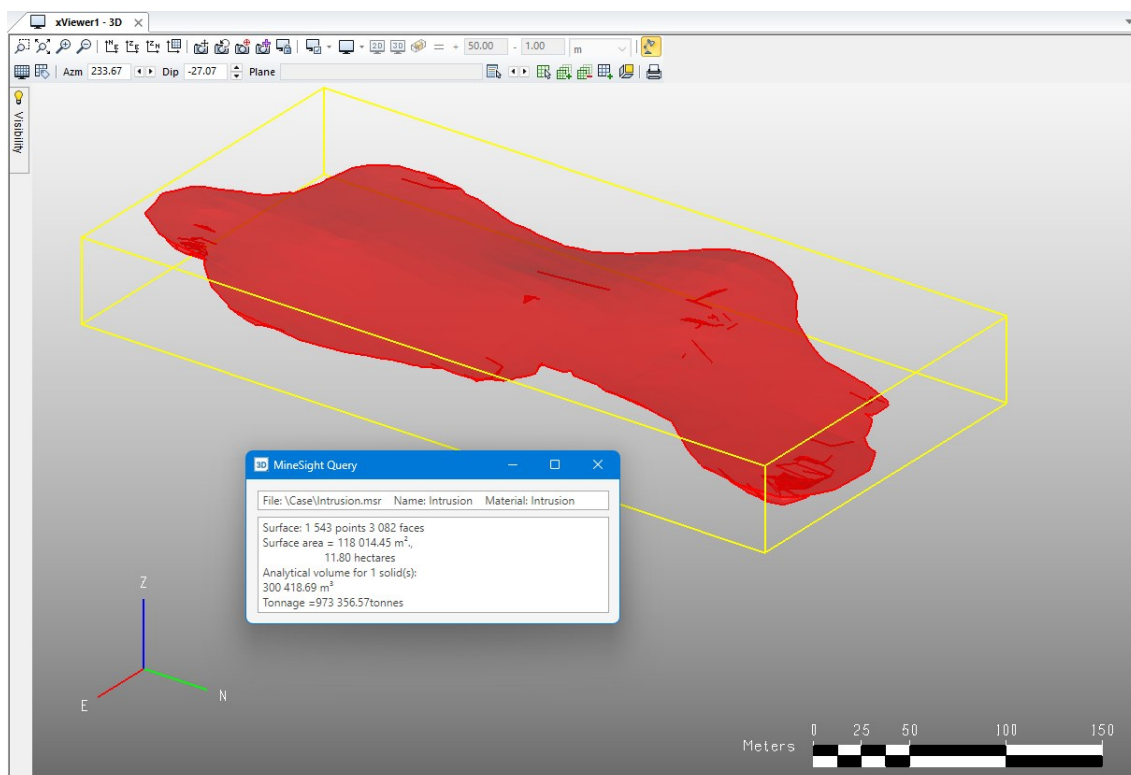


Figura 14 - Aferição de volume e tonelage do sólido de minério direto na interface do MinePlan.

3.2.7 Classificação do recurso mineral

A partir do Guia CBRR (2022), como visto na **Figura 2**, é possível classificar um recurso mineral como Inferido, Indicado ou Medido, dependendo do nível de confiabilidade e conhecimento geológico associados à uma ocorrência mineral. Dessa forma, a quantidade e a qualidade de dados, bem como robustez de suas interpretações e qualidade do modelo geológico são essenciais para classificar corretamente um recurso.

Uma vez que o modelo construído neste trabalho foi resultado de diversas adaptações, escassez de informações e saltos interpretativos, o mais adequado é classificar os recursos minerais modelados como inferidos e indicados. Isto é defensável, pois há dados diretos (indicados) obtidos na sondagem, abertura de poços e trincheiras, bem como dados indiretos (inferidos) obtidos com os caminhamentos geofísicos.

A evolução do recurso para Medido pode acontecer mediante a aquisição de novas informações em campo, como a execução de mais furos de sondagem e um levantamento topográfico de detalhe, por exemplo. Já a conversão para reservas exige uma avaliação criteriosa do ponto de vista da viabilidade da extração econômica, o que extrapola o escopo deste trabalho.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho foi bem-sucedido ao conseguir elaborar um modelo geológico preliminar, adequado às exigências da fase de pesquisa mineral, para um depósito de ferro coluvionar na Bahia. Apesar da escassez de dados e inconsistências entre as informações existentes, foi possível aplicar o conhecimento geológico e de modelagem para contornar tais problemas e produzir um modelo coeso, aceitável e defensável.

Além disso, foi possível apontar, um a um, cada problema encontrado e a maneira de corrigi-lo numa sequência lógica dentro do processo de modelagem. Isto é importante para fomentar a discussão de técnicas de modelagem e seus impactos na estimativa e classificação de recursos e reservas.

Obteve-se um modelo preliminar simplificado, com litotipos agrupados, cujo minério apresenta um volume de 300.418,69 m³ e uma massa de 973.556,57 toneladas. Classificando-se como recursos minerais inferidos e indicados.

No contexto deste trabalho, o resultado obtido é satisfatório pois cumpre com os objetivos levantados, mas como consideração final chama-se a atenção para a necessidade de adensamento da malha de sondagem, coleta de mais amostras e levantamento topográfico preciso e aplicável a todas as fontes de dados posicionais. Isto certamente contribuirá para o refinamento do modelo geológico apresentado, bem como para a avaliação econômica exigida para a classificação e declaração de reservas minerais.

REFERÊNCIAS

COMISSÃO BRASILEIRA DE RECURSOS E RESERVAS (CBRR). **Guia CBRR para declaração de informações de exploração, recursos minerais e reservas minerais**. Brasília: CBRR, 2022. 85 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM). **Economia mineral do Brasil**. Brasília: IBRAM, 2018. Disponível em: <https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2021/07/economia-mineral-brasil-set2018.pdf>. Acesso em: 1 jun. 2025.

FERREIRA, M. S. **Modelagem tridimensional de depósitos minerais**. 2006. 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2006. Disponível em: <http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/2450>. Acesso em: 1 jun. 2025.

GUEDES, P. L.; GONÇALVES, I. G.; CORDOVA, D.; GUADAGNIN, F. **geoML: um software livre para modelagem geológica através de aprendizagem de máquina**. 2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.21322.68804>. Acesso em: 1 jun. 2025.

KEAREY, P; BROOKS, M; HILL, I. **Geofísica de Exploração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009

LOKE, M. H. **Tutorial: 2-D and 3-D Electrical Imaging Surveys**. 2025. Disponível em: geotomosoft.com. Acesso em: 11 dez. 2025.

LONGO, I. **Análise da incerteza na modelagem geológica em depósitos minerais de ferro**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2023. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/262682>. Acesso em: 1 jun. 2025

ROLO, R. M.. **Modelagem geológica e avaliação de incerteza em modelos geológicos usando funções distância assinaladas**. 2021. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, 2021.

SAD, J. H. G.; VALENTE, J. M. G. P. **Delineação de depósitos minerais**. 1. ed. Belo Horizonte: Geosol; Fundação Victor Dequech, 2007. 272 p.