

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
BACHARELADO EM GEOFÍSICA

Modelagem de dados TDEM aplicado à mineração na região de Rio das Velhas (MG)

**Discente: Alamim Justino de Almeida Junior
Matrícula: 18/0051709**

Orientadora: Profa. Dra. Mônica Giannoccaro Von Huelsen

Brasília-DF

Setembro de 2022

Alamim Justino de Almeida Junior

Modelagem de dados TDEM aplicado à mineração na região de Rio das Velhas (MG)

Trabalho final de conclusão de curso apresentado ao Instituto de Geociências da Universidade de Brasília, como exigência e requisito para obtenção do grau de Bacharel em Geofísica.

Orientadora: Profa. Dra. Mônica Giannoccaro Von Huelsen

Brasília-DF

Setembro de 2022

Alamim Justino de Almeida Junior

Modelagem de dados TDEM aplicado à mineração na região de Rio das Velhas (MG)

Banca Examinadora:

Profa. Dra. Mônica Giannoccaro Von Huelsen

Prof. Dr. George Sand L. Araújo de França

Msc. Marcos César Soares de Queiroz

Brasília-DF

Setembro de 2022

Sumário

Resumo	5
Abstract	6
LISTA DE FIGURAS.....	7
LISTA DE TABELAS.....	8
1. Introdução.....	9
1.1 Apresentação.....	9
1.2 Objetivos.....	9
2. Área de Estudo	9
2.1 Localização.....	9
2.2 Contexto geológico-estrutural	10
2.2.1 Quadrilátero Ferrífero	10
2.2.2 <i>Greenstone Belt</i> Rio das Velhas	11
2.2.3 Evolução Tectônica do <i>Greenstone Belt</i> Rio das Velhas.....	12
2.2.4 Depósito Auríferos Orogênicos	12
3. Fundamentação Teórica	12
3.1 Teoria Básica do Método Eletromagnético	12
3.1.1 Fundamentos da Eletromagnetometria	12
3.1.2 Método Eletromagnético no Domínio do Tempo (TDEM)	14
3.1.3 Alcance do Campo Eletromagnético e Resistividade	14
4. Metodologias	16
4.1 Aquisição.....	16
4.2 Processamento	18
4.3 Produtos Qualitativos.....	18
4.4 Produtos Semi-quantitativos	22
5. Análise e Interpretação	24
5.1 Análise Qualitativa	24
5.2 Análise Semi-quantitativa	27
6. Discussão e Conclusão.....	37
7. Referências.....	38

Resumo

A geofísica aérea tem sido uma ferramenta crucial para a exploração mineral, facilitando e economizando no mapeamento geológico e mineral. Com o desenvolvimento de novas tecnologias, a aplicação do método eletromagnético aerotransportado (AEM) no domínio do tempo vem trazendo conhecimentos do campo eletromagnético (EM) em subsuperfície do Brasil. O conhecimento do campo EM em subsuperfície brasileira é instrumento para o planejamento e a implementação de políticas públicas focadas no desenvolvimento sustentável dos recursos minerais. Este trabalho busca testar técnicas de processamento em desenvolvimento de dados eletromagnéticos na região de Rio das Velhas, rica em ouro e outros minerais, como ferro, cobre, níquel cromo. As áreas de estudo no Quadrilátero Ferrífero estão localizadas próximas à capital mineira, Belo Horizonte, em uma região denominada *Greenstone Belt* Rio das Velhas. A área 1 é denominada de Nova Lima/Caeté e a área 2 como Santa Bárbara/Barão de Cocais. Foram geradas imagens do campo eletromagnético secundário para uma análise qualitativa e para uma melhor visualização dos resultados, foi gerada uma imagem ternária - CMY. Foram também elaboradas imagens Voxel da profundidade pela condutividade (CDI), além da imagem 3D, resultados da inversão 1D obtida com o software ImagEM, para um estudo semi-quantitativo em profundidade. Esta pesquisa objetiva aprimorar a interpretação EM e disponibilizar ferramentas que proporcionem uma interpretação qualitativa e semi-quantitativa. Com este estudo foi possível observar anomalias condutivas próximas às mineradoras de ouro das áreas de estudo além de outras anomalias condutivas da região.

Palavras chave: quadrilátero ferrífero, mineração, eletromagnetometria, domínio do tempo, interpretação qualitativa, interpretação semi-quantitativa

Abstract

Airborne geophysics has been a crucial tool for mineral exploration, facilitating and saving money on geological and mineral mapping. With the development of new technologies, the application of the airborne electromagnetic method (AEM) in the time domain has brought knowledge of the electromagnetic field (EM) in the subsurface of Brazil. The knowledge of the EM field of the Brazilian subsurface is an instrument for planning and implementing of public policies focused on the sustainable development of mineral resources. This work seeks to test processing techniques in development of the electromagnetic data in the region of *Rio das Velhas* at the Iron Quadrilateral, rich in gold and other minerals, such as iron, copper, nickel chromium. The study areas are located near the capital of *Minas Gerais*, *Belo Horizonte*, in a region called Greenstone Belt *Rio das Velhas*. Area 1 is called *Nova Lima/Caeté* and area 2 as *Santa Bárbara/Barão de Cocais*. Images of the secondary electromagnetic field were generated for a qualitative analysis and for a better visualization of the results, a ternary image - CMY - was generated. Voxel images of depth by conductivity (CDI) were also generated, in addition to the 3D image, results of the 1D inversion obtained with the ImagEM software, for a semi-quantitative study in depth. This research aims to improve EM interpretation and deliver tools that provide a qualitative and semi-quantitative interpretation. With this study, it was possible to observe conductive anomalies close to gold mines of the study areas, in addition to other conductive anomalies in the region.

Keywords: iron quadrangle, mining, electromagnetometry, time domain, qualitative interpretation, semi-quantitative interpretation

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localização das áreas 1 e 2 do projeto geofísico aerotransportado Rio das Velhas com o modelo digital de terreno.	10
Figura 2. A esquerda mapa geológico das áreas de estudo destacando as cinco principais associações de rochas (Adaptado de: Dorr, 1969 e Silva, 1999). A direita, coluna estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero (Alkmin & Noce, 2006).	11
Figura 3. Comportamento esquemático dos campos magnéticos primário e secundário (Adaptado de: Von Huelsen, M. G. 2020).	13
Figura 4. Forma de onda da corrente injetada no transmissor (triangular na cor preta), do campo secundário para um alvo de alta condutância (vermelho) e baixa condutância (azul) (retirado de CPRM, 2012).	17
Figura 5. Fluxograma exemplificando o processamento e interpretação dos dados eletromagnéticos.	18
Figura 6. Imagem do campo magnético secundário off-time do canal 2, de profundidade rasa. As mineradoras de ouro da região são destacadas com o símbolo ✂.	19
Figura 7. Imagem do campo magnético secundário off-time do canal 5, de profundidade intermediária. As mineradoras de ouro da região são destacadas com o símbolo ✂.	20
Figura 8. Imagem do campo magnético secundário off-time do canal 10, de maior profundidade. As mineradoras de ouro da região são destacadas com o símbolo ✂.	21
Figura 9. Imagem CMY (Ciano, Magenta e Yellow), canal profundo (cor ciano), intermediário (magenta) e raso (amarelo/yellow). As mineradoras com o símbolo ✂ em amarelo.	22
Figura 10. Mapa VOXEL das duas áreas de estudo.	23
Figura 11. Vista em 3D das CDIs amostradas a cada 10, totalizando 44 CDIs das áreas 1 e 2.	24
Figura 12. Imagem CMY em conjunto com as estruturas condutivas. Estruturas amarelas referentes ao campo secundário do canal 2 (mais raso) e estruturas rosas referentes ao canal 10 (mais profundo). As mineradoras com o símbolo ✂ em vermelho.	25
Figura 13. Roseta das estruturas condutivas rasas e profundas da área 1. Direção média $111^{\circ} \pm 10.7^{\circ}$ SE/NW. Número de amostras: 120.	26
Figura 14. Roseta das estruturas condutivas rasas e profundas da área 2. Direção média $49.4^{\circ} \pm 3.2^{\circ}$ NE/SW. Número de amostras: 95.	26
Figura 15. Mapa com as linhas de levantamento escolhidas (em preto) em comparação com o ZOFF2 (mais raso) e mineradoras.	27
Figura 16. CDI da área 1, linha 20840:114, direção SE-NW. Os perfis acima da CDI representam os ZOFF2, ZOFF5 e ZOFF10. Com a localização da mineradora. Abaixo um zoom dá área onde se encontra a mineradora.	28
Figura 17. CDI da área 1, linha 21120:106, direção SE-NW. Os perfis acima da CDI representam os ZOFF2, ZOFF5 e ZOFF10. Com a localização da mineradora. Abaixo um zoom da área em que se encontra a mineradora.	29
Figura 18. CDI da área 2, linha 30140:78, direção SE-NW. Os perfis acima da CDI representam os ZOFF2, ZOFF5 e ZOFF10. Com a localização da mineradora. Abaixo um zoom da área em que se encontra a mineradora.	30
Figura 19. CDI da área 2, linha 30442:78, direção SE-NW. Os perfis acima da CDI representam os ZOFF2, ZOFF5 e ZOFF10. Com a localização das mineradoras. Abaixo um zoom das áreas em que se encontram as mineradoras.	31

Figura 20. Vista de cima da imagem das cinco isosuperfícies geradas na região, com as mineradoras em preto.	32
Figura 21. Vista de cima da imagem das duas isosuperfícies mais condutivas (amarelo e vermelho), com as mineradoras em preto.....	32
Figura 22. Vista de cima da imagem da isosuperfície mais condutiva (vermelho), com as mineradoras em preto.	33
Figura 23. Isosuperfícies com condutividades 4,36nS/m (amarelo) e 13,8nS/m (vermelho), os cilindros pretos são as mineradoras. A) Vista de cima, B) vista das isosuperfícies com inclinação e azimute 0.	34
Figura 24. Vistas de cima das isosuperfícies com condutividades 4,36nS/m (amarelo) e 13,8nS/m (vermelho) para as cotas variando de A) 1500 a 576; B) 1000 a 586m; C) 800 a 586m e D) 700 a 586m.	35
Figura 25. Vistas de cima dos mapas CMY em comparação com as isosuperfícies com condutividades 4,36nS/m (amarelo) e 13,8nS/m (vermelho) para as cotas variando de A) 1500 a 576; B) 1000 a 586m; C) 800 a 586m e D) 700 a 586m.	36
Figura 26. Sobreposição do zoom da CDI 20840, na região da Mina Lamego com a litologia obtida do borehole (Couto, 2021; Martins et al., 2016).	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Dimensões das áreas de levantamento e distância percorrida nas linhas de voo.	16
---	----

1. Introdução

1.1 Apresentação

A geofísica aérea vem sendo uma ferramenta crucial para a exploração mineral, por facilitar a aquisição de dados geofísicos e economizar no mapeamento geológico. Com o desenvolvimento de novas tecnologias, a utilização do método eletromagnético aerotransportado (AEM) no domínio do tempo tornou-se fundamental para fornecer dados do campo eletromagnético (EM) da subsuperfície terrestre. Por meio desse método, regiões como África, América do Sul e Austrália, onde 80% da área é coberta por regolitos e rochas sedimentares, puderam ser exploradas economicamente pelos métodos geofísicos indiretos (Reford *et al.*, 2009; Ley-Cooper *et al.*, 2017; Nabighian & Macnae, 2005).

Uma das aplicações do estudo do campo eletromagnético no Brasil é o planejamento e implementação de políticas públicas focadas no desenvolvimento sustentável dos recursos minerais. Existe ainda um grande potencial mineral inexplorado no nosso país, e essa lacuna juntamente com os investimentos na área do Meio Ambiente, Social e Governança (da sigla em inglês, ESG – “*Environmental, Social, and Governance*”) geraria um potencial para a criação de novos trabalhos e para o desenvolvimento nacional.

1.2 Objetivos

Esta pesquisa tem como objetivo principal a aplicação de técnicas de interpretação e modelagem eletromagnetométrica que vem sendo desenvolvida na Universidade de Brasília/Instituto de Geociências/Observatório Sismológico (UnB/IG/SIS). A metodologia de interpretação utilizada nesta pesquisa objetivou sua aplicabilidade na área de mineração. Assim a região em estudo são as áreas I e II do levantamento eletromagnético aerotransportado de Rio das Velhas no Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais (Brasil). O produto final facilitará a interpretação geofísica nas áreas de interesse mineral visualizando a exploração de recursos minerais principalmente o Ouro.

Serão apresentados produtos finais qualitativos e imagens semi-quantitativas EM que servirão na modelagem da área.

2. Área de Estudo

2.1 Localização

As áreas de estudo estão localizadas próximas à capital mineira, Belo Horizonte. Dividida em duas áreas, sendo a área 1, Nova Lima/Caeté, e a área 2, Santa Bárbara/Barão de Cocais. Essas duas áreas referentes ao projeto geofísico aerotransportado Rio das Velhas – Etapa II (CPRM, 2012) são mostradas na **figura 1**.

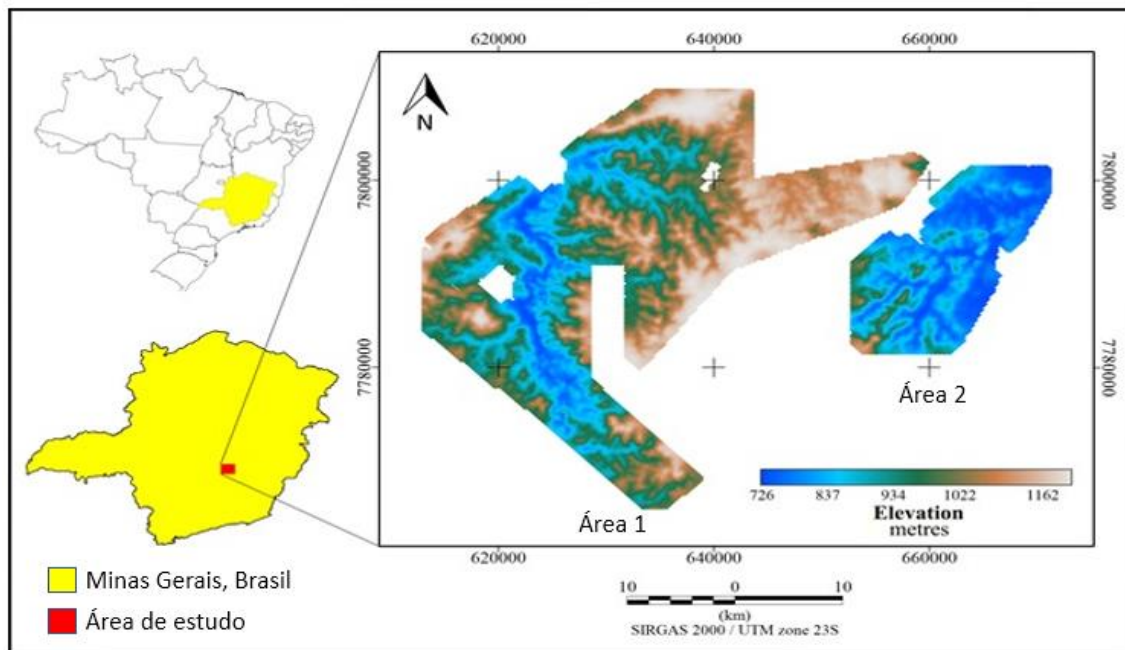


Figura 1. Localização das áreas 1 e 2 do projeto geofísico aerotransportado Rio das Velhas com o modelo digital de terreno.

2.2 Contexto geológico-estrutural

O contexto geológico-estrutural da região vem sendo estudado há décadas, com diversos levantamentos visando o estudo do potencial mineral, o que torna a área uma das principais regiões produtoras de minerais do Brasil.

2.2.1 Quadrilátero Ferrífero

O Quadrilátero Ferrífero (QF) está localizado na região sul do Cráton São Francisco e apresenta um terreno granito greenstone belt coberto por sequências supracrustais proterozoicas. Seu relevo é muito acidentado com serras perpendiculares entre si e ao longo dessas serras, são encontrados muitos depósitos minerais. Nessa região são encontradas cinco principais associações de rochas: embasamento cristalino arqueano, Supergrupo Rio das Velhas, Supergrupo Minas, Grupo Itacolomi e Supergrupo Espinhaço (Baltazar & Zucchetti, 2007; Alkmin & Marshak, 1998).

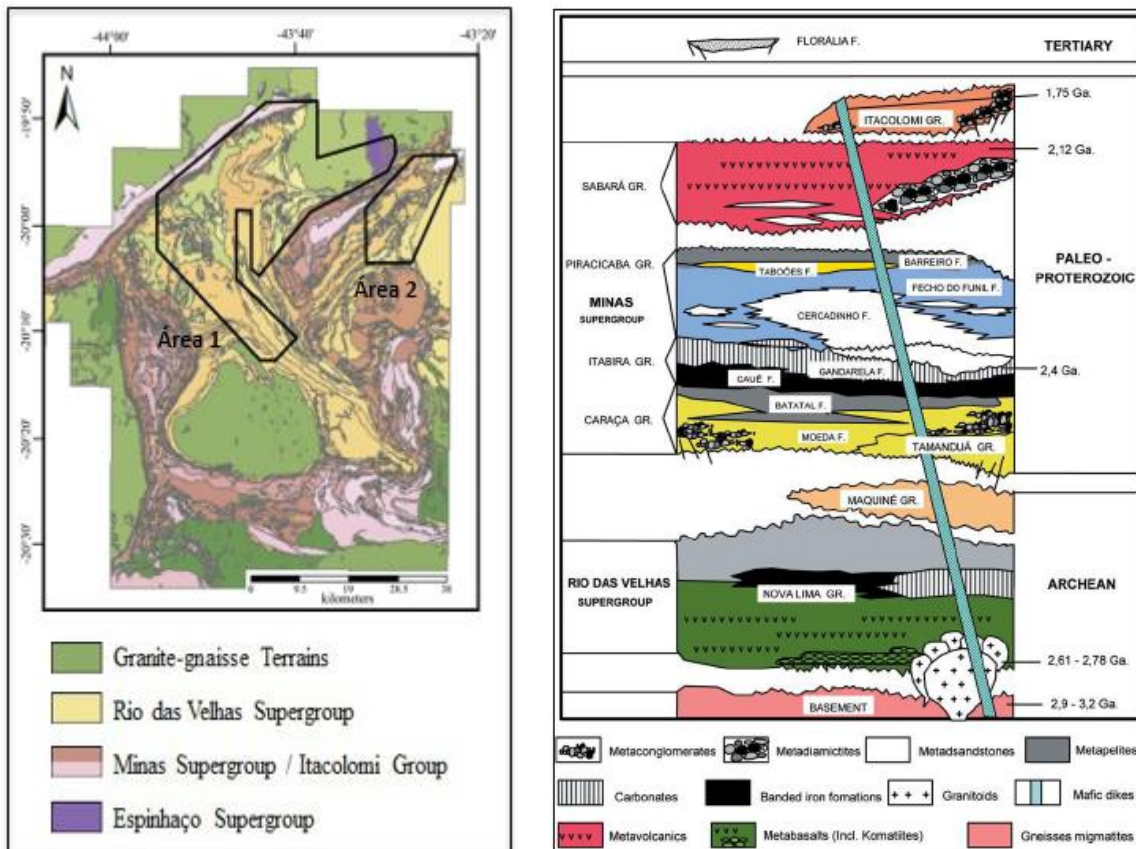


Figura 2. A esquerda mapa geológico das áreas de estudo destacando as cinco principais associações de rochas (Adaptado de: Dorr, 1969 e Silva, 1999). A direita, coluna estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero (Alkmin & Noce, 2006).

2.2.2 Greenstone Belt Rio das Velhas

Em diferentes partes do mundo, os *greenstone belts* são famosos por apresentarem inúmeros depósitos minerais. Por essa razão são áreas de muito estudo na prospecção mineral.

Dentre as unidades presentes na região, destacamos a sequência Vulcano-sedimentar Arqueana, que inclui o *Greenstone Belt* de Rio das Velhas. Regiões Arqueanas de *Greenstone Belts* são conhecidas por compreenderem depósitos com mineralizações de cobre (Cu), níquel (Ni), ferro (Fe), ouro (Au) e cromo (Cr) (Condie, 1981).

Ambientes de greenstone belt são conhecidos pelos seus depósitos orogênicos e segundo Goldfarb e Groves, 2015, a maioria destes depósitos auríferos orogênicos se formaram durante a fase de evolução final de terrenos de bordas tectônicas em ambientes de subducção. Nas regiões de estudo são encontradas cinco grandes mineradoras de ouro, duas na área 1 e três na área 2.

A estratigrafia do supergrupo Rio das Velhas é caracterizada por rochas metaultramáficas vulcânicas (metakomatiitos) do Grupo Quebra Osso em sua porção inferior, na camada intermediária é encontrado o Grupo Nova Lima de rochas Vulcano-sedimentares máficas e na parte superior o Grupo Maquiné, clástico (Condie, 1981).

2.2.3 Evolução Tectônica do *Greenstone Belt* Rio das Velhas

Depósitos de ouro orogênicos estão distribuídos dentro de cinturões metamórficos ao redor do planeta e são de idades entre o Paleoarqueano e Terciário (Goldfarb & Groves, 2015). De acordo com os estudos de (Baltazar & Zucchetti, 2007) houveram quatro eventos deformacionais nessa região. A primeira fase ocorreu no período Arqueano com regime compressivo N-S. A segunda, também de idade Arqueana, e regime compressivo NE-SW. A terceira fase é de idade Paleoproterozóica com regime extensional. Já a quarta e última fase é contracional de idade Neoproterozóica.

2.2.4 Depósito Auríferos Orogênicos

A metalogênese do ouro no greenstone belt Rio das Velhas é destacada no Grupo Nova Lima e esse Grupo vem sendo o principal produtor de ouro há muitos séculos na região. Neste ambiente de ouro orogênico, as principais rochas hospedeiras são a formação ferrífera bandada, seguida pela rocha hidrotermalizada denominada lapa seca (Lobato *et al.*, 2001).

3. Fundamentação Teórica

3.1 Teoria Básica do Método Eletromagnético

Os métodos eletromagnéticos (EM) envolvem a propagação de campos eletromagnéticos e baseiam-se no contraste das propriedades elétricas e magnéticas do subsolo. Se esses contrastes forem suficientemente grandes, então as anomalias serão detectadas (Ogilvy & Lee, 1991). Os métodos EM são utilizados extensivamente por geofísicos para investigar os materiais existentes na subsuperfície terrestre. Variações nas propriedades podem indicar alvos geológicos, ou até mesmo, produtos da ação humana, como artefatos arqueológicos. Esse método pode ser aplicado na detecção de poluição da subsuperfície (lixo doméstico, hospitalar, vazamento de óleo e etc.), de hidrocarbonetos e de minerais como cobre, zinco, ouro, cromo, ferro e etc. Nesta pesquisa o método será utilizado para minerais, com foco no ouro.

3.1.1 Fundamentos da Eletromagnetometria

Os métodos EM empregam medidas do campo magnético variante no tempo que é gerado pela indução de corrente de fluxo dentro da Terra. Nessa técnica, a indução do campo eletromagnético é gerada na superfície da terra (transmissor) produzindo uma corrente no meio a ser percorrido a qual varia com o tempo. Um receptor é colocado para comparar a variação entre o campo magnético produzido pelo fluxo de corrente na Terra (campo secundário) com o gerado na fonte (Gomes, 2003) (**figura 3**).

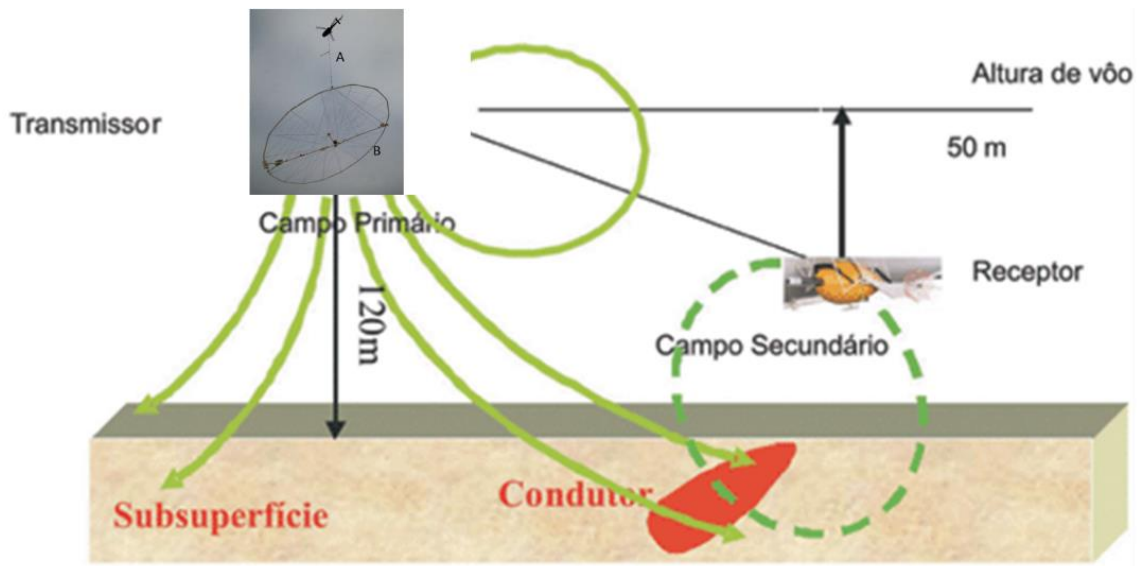


Figura 3. Comportamento esquemático dos campos magnéticos primário e secundário (Adaptado de: Von Huelsen, M. G. 2020).

O entendimento dos fenômenos ondulatórios durante a propagação no meio e interação da onda eletromagnética com as estruturas em subsuperfície é vital para a correta utilização do método e interpretação de dados, sendo assim, torna-se necessário o entendimento da teoria eletromagnética clássica de Maxwell (Font, 2016).

Nesta pesquisa será considerada, como na maioria dos problemas geofísicos, a Terra como um meio isotrópico, homogêneo, e os parâmetros elétricos independentes do tempo e da pressão. O modelo completo será construído pela justaposição de camadas isotrópicas e homogêneas, onde a equação de onda pode ser postulada para cada região, cuja solução baseia-se nas equações de Maxwell (equações a seguir: **1 – Lei de Ampère-Maxwell, 2 – Lei de Faraday, 3 – Lei de Gauss para o Magnetismo e 4 – Lei de Gauss**), (Font, 2016).

$$\vec{\nabla} \times \vec{h} = \vec{j} + \frac{\partial d}{\partial t} \quad (1)$$

Lei de Ampère-Maxwell, onde $\vec{\nabla} \times \vec{h}$: Rotacional de um campo h , \vec{h} : Intensidade do campo magnético (A/m), \vec{j} : vetor densidade de fluxo de corrente (A/m²), d : Deslocamento elétrico (C/m²)

$$\vec{\nabla} \times \vec{e} = -\frac{\partial \vec{b}}{\partial t} \quad (2)$$

Lei de Faraday, onde $\vec{\nabla} \times \vec{e}$: rotacional de um campo e , \vec{e} : intensidade do campo elétrico (V/m), \vec{b} : vetor indução magnética (Wb/m² ou Tesla).

$$\nabla \cdot \vec{b} = 0 \quad (3)$$

Lei de Gauss para o magnetismo. Onde $\nabla \cdot \vec{b}$ é o divergente do campo magnético b .

$$\nabla \cdot \vec{d} = \rho \quad (4)$$

Lei de Gauss, onde $\nabla \cdot \vec{d}$ é o divergente da densidade de fluxo elétrico d , ρ : densidade volumétrica de carga elétrica (C/m^3).

Aplicando o gradiente nas equações 1 (Lei de Ampère-Maxwell) e 2 (Lei de Faraday) obtém-se as equações de onda abaixo (5 e 6) no domínio do tempo (Nabighian & Macnae, 1987a):

$$\nabla^2 e - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{e}}{\partial t^2} - \mu\sigma \frac{\partial \vec{e}}{\partial t} = 0 \quad (5)$$

$$\nabla^2 h - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{h}}{\partial t^2} - \mu\sigma \frac{\partial \vec{h}}{\partial t} = 0 \quad (6)$$

Onde μ : permeabilidade magnética (Wb/A), ϵ : permeabilidade dielétrica (C^2/Nm^2) e σ : condutividade elétrica (S/m).

A solução das equações acima fornece o comportamento do campo magnético e elétrico com a profundidade e em função da condutividade do meio. A seguir será apresentada uma relação empírica, mas baseada na teoria acima da profundidade alcançada pelo sinal eletromagnético.

3.1.2 Método Eletromagnético no Domínio do Tempo (TDEM)

Os resultados desse estudo usam os dados eletromagnéticos no domínio do tempo, esse método TDEM (da sigla em inglês, *Time Domain Electromagnetic Methods*) é um método de indução eletromagnética (EM) usado para mapear o contraste de condutividade (ou resistividade) em subsuperfície. É um método bastante utilizado em explorações minerais (Nabighian & Macnae, 1987b).

3.1.3 Alcance do Campo Eletromagnético e Resistividade

A penetração de ondas EM está bem descrita por Telford et al. (1990). Essa profundidade de alcance, também conhecida como *skin depth*, é descrita pela equação:

$$\delta = 500 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (7)$$

Onde δ : profundidade (em metros), ρ : resistividade, f : frequência. Com isso, é possível observar que a resistividade é inversamente proporcional à frequência, e quando a resistividade é baixa ou a frequência é alta, o campo magnético irá penetrar pouco em subsuperfície.

Nesse estudo foi utilizado o software ImagEM (Travaglia, 2016), que emprega o método eletromagnético no domínio do tempo. Esse software utiliza o campo magnético secundário como base para obter uma estimativa da profundidade dos alvos além dos resultados da resistividade e condutividade aparente. Com isso é possível obter uma imagem da resistividade pela profundidade (Travaglia, 2016).

Com base na Lei de Faraday descrita acima, Frischknecht & Raab (1984) demonstraram que em um primeiro momento a corrente elétrica fica limitada à superfície do condutor (denominado de canais *early time*) e quando essa corrente começa a ser dissipada (denominado de canais *late time*), existe uma diminuição do campo magnético que gera corrente no meio. Quanto mais condutor for o corpo, mais intenso o campo magnético emitido por ele e maior o tempo de interação eletromagnética captado pela bobina receptora.

A resistividade dos canais iniciais (*early time*) e utilizada pelo ImagEM é dada por (Frischknecht & Raab, 1984):

$$\rho_{et} = \frac{r_{Tx}^3 \cdot \frac{dB_x}{dt}}{3r_{Rx}} \quad (8)$$

Onde ρ_{et} : resistividade *early time*, r_{Tx} : raio do transmissor (m), r_{Rx} : área efetiva do receptor (m²) e $\frac{dB_x}{dt}$: impedância na componente vertical obtida pela bobina receptora (V/A).

Para os canais finais (*late time*) ocorre uma diminuição da amplitude do campo secundário e a resistividade é descrita por (Frischknecht & Raab, 1984):

$$\rho_{lt} = \frac{\mu}{4\pi t} \sqrt[3]{\left(\frac{4\mu Tm}{t \cdot \frac{dB_x}{dt}}\right)^2} \quad (9)$$

Onde μ : permeabilidade magnética no vácuo (Wb/A·m), Tm : momento dipolo do transmissor que é dado pelo produto da corrente pela área do transmissor, t : tempo médio que cada canal registra o campo secundário (s).

Utilizando-se da resistividade do alvo e do tempo médio de decaimento de cada canal, o ImagEM consegue calcular a profundidade (d) a partir da seguinte equação (Travaglia, 2016).

$$d = 750 \sqrt{t \cdot \rho} \quad (10)$$

Onde t : tempo médio de cada canal em segundos e ρ : resistividade aparente ($\Omega \cdot m$).

4. Metodologias

4.1 Aquisição

Esse estudo se utilizou do Sistema Eletromagnético Aerotransportado (AEM) para a aquisição dos dados. O método EM aerotransportado vem sendo usado nas últimas décadas com bons resultados. A utilização de helicópteros a partir dos anos 2000 se tornou um dos principais meios aerotransportados na exploração mineral, pelo fato de coletarem dados laterais de alta resolução dos corpos condutores, além de fazerem uma aquisição detalhada e rápida de grandes áreas de interesse (Couto, 2021).

A aquisição dos levantamentos aerogeofísicos na área de Rio das Velhas foi realizada pelo Serviço Geológico Brasileiro (SGB-CPRM) e constaram de 3.400 km de perfis eletromagnetométricos (EM) aerotransportados de alta resolução, com linhas de voo espaçadas de 250 metros e orientadas na direção N45°W (Tabela 1, CPRM, 2012).

Tabela 1. Dimensões das áreas de levantamento e distância percorrida nas linhas de voo.

Área de Levantamento	Área (km ²)	Linhas de voo (km)
Área 1	661	2.644,55
Área 2	239	755,45
Total	900	3.400

Os parâmetros que nortearam a execução do levantamento são descritos, resumidamente, a seguir (CPRM, 2012):

- Direção das linhas de voo: N45°W;
- Espaçamento entre as linhas de voo: 250 metros;
- Intervalo entre medições geofísicas consecutivas: 0,1s (eletromagnetométrico);
- Altura média de voo: 120 metros para regiões com topografia acidentada e 90 metros para as demais regiões sobrevoadas;
- Velocidade aproximada de voo: 80 km/h.

O levantamento foi efetuado utilizando uma aeronave de asas rotativas, modelo AS350 B3, prefixo PT-YOY. Foi utilizado um sistema eletromagnético no domínio do tempo da Aeroquest, denominado AeroTEM HD, composto por um sistema de aquisição AeroDAS localizado no interior da aeronave, uma bobina transmissora e um receptor, que foram rebocados pelo helicóptero. A bobina transmissora possui um momento de dipolo magnético com pico de 711 kNiA (K: unidade em milhar kilo; N: número de voltas da bobina transmissora; i: valor da corrente máxima do gerador em amperes; A: área da bobina transmissora). O loop desse sistema é rebocado 60 metros abaixo da aeronave (CPRM, 2012).

A aquisição dos dados eletromagnéticos pelo AeroTEM HD é dividida em “On-time” (ativo), com 16 canais, e “Off-time” (inativo), com 17 canais. O transmissor gera uma corrente, que a cada pulso on-time, alterna a polaridade. O monitor de corrente efetua a leitura de 600 canais, durante todo o ciclo do transmissor (*Tx on-off* - transmissor ativo e inativo, gerando 60 leituras por segundo), derivada da forma de onda do campo magnético nas bobinas receptoras orientadas nos eixos X e Z (CPRM, 2012). A **figura 4** demonstra a forma de onda da corrente (triangular) e do campo secundário com o transmissor ligado e desligado (*on-time* e *off-time*) e a curva de decaimento para um alvo com alta condutância (vermelho) e baixa condutância (azul).

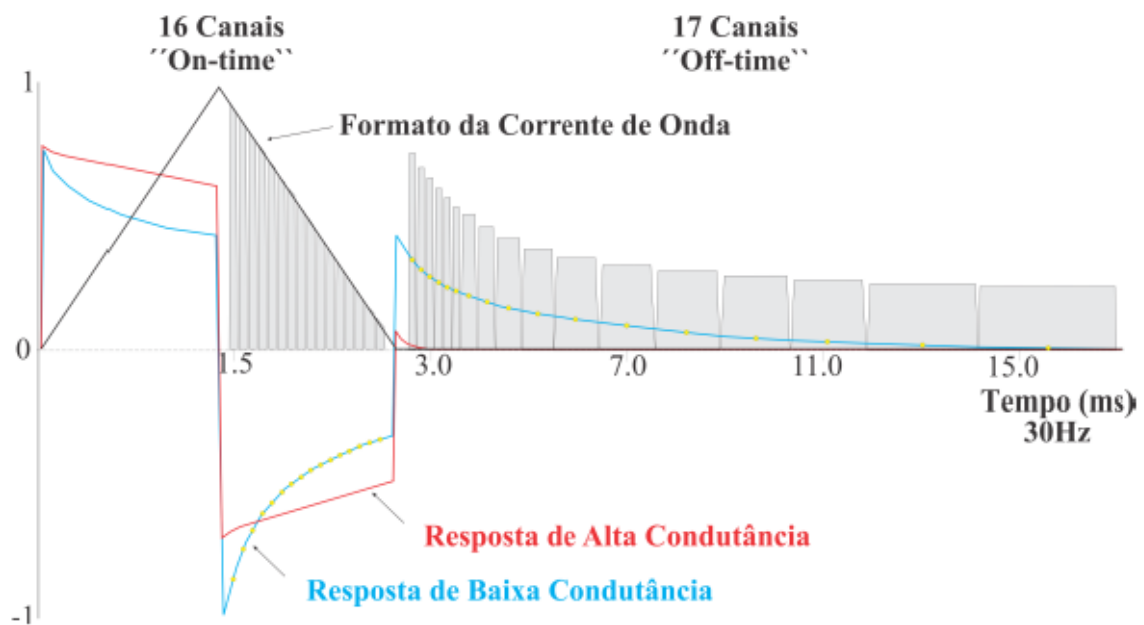


Figura 4. Forma de onda da corrente injetada no transmissor (triangular na cor preta), do campo secundário para um alvo de alta condutância (vermelho) e baixa condutância (azul) (retirado de CPRM, 2012).

4.2 Processamento

Com os dados fornecidos pela CPRM, foi possível então começar o processamento dos dados que seguiu o fluxograma da figura 5.

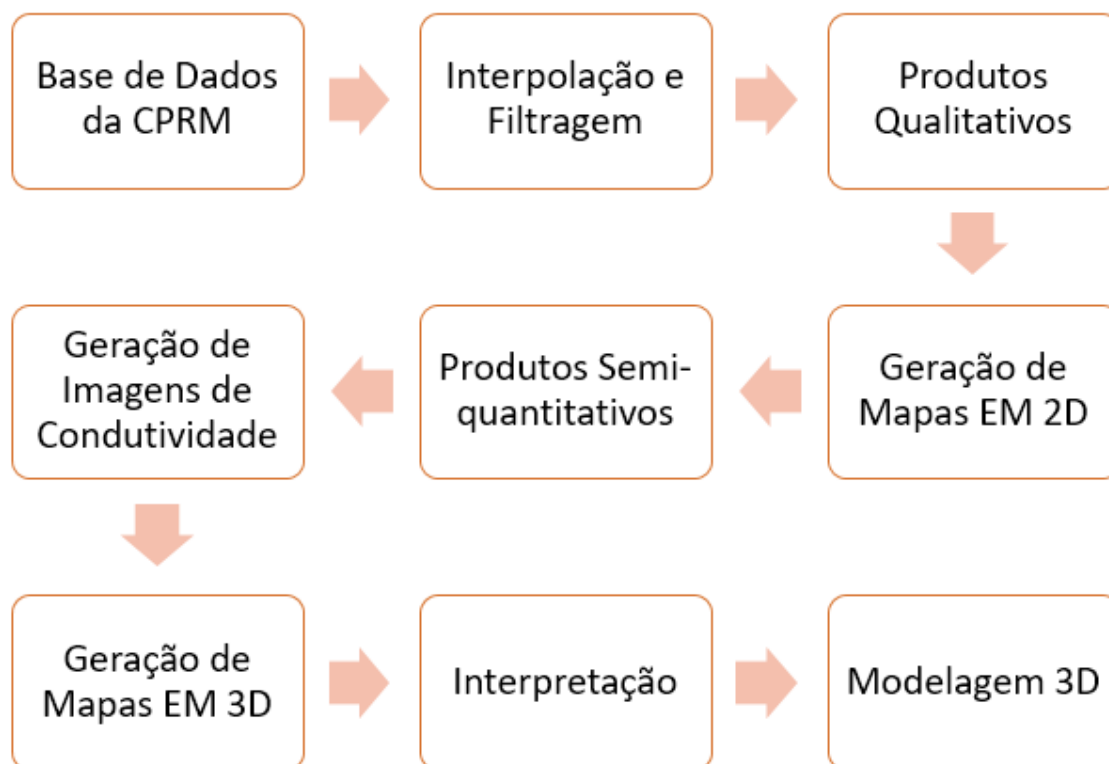


Figura 5. Fluxograma exemplificando o processamento e interpretação dos dados eletromagnéticos.

4.3 Produtos Qualitativos

O processamento para gerar os produtos qualitativos referentes aos dados eletromagnéticos, foi realizado utilizando o software Oasis Montaj (Geosoft, 2020).

Foi aplicado o método estatístico do *krigging* com tamanho de célula de 70m para cada um dos 16 *canais off-time*. Os filtros utilizados nesse estudo foram o hanning e cosseno direcional. Com o objetivo de analisar as áreas condutivas e as profundidades das estruturas condutivas foram consideradas as imagens dos canais *off-time* de 1 a 10, sendo o Zoff 1 para áreas mais rasas e Zoff 10 para regiões mais profundas. Dentre as imagens analisadas, foram escolhidas as dos canais: 2 (Valor Central do Tempo: 4652,8 μ s), 5 (4791,7 μ s) e 10 (5819,4 μ s) (**Figuras 6, 7 e 8**). Sendo o canal 2, mais raso, e o canal 10, de maior profundidade. Observa-se ruído de maior frequência no canal 10 (mais profundo), isto acontece porque a amplitude do sinal cai exponencialmente com a profundidade (Zakarewicz *et al.*, 2019).

Após o processamento e filtragem dos dados originais descritos foram gerados os seguintes mapas do campo EM secundário.

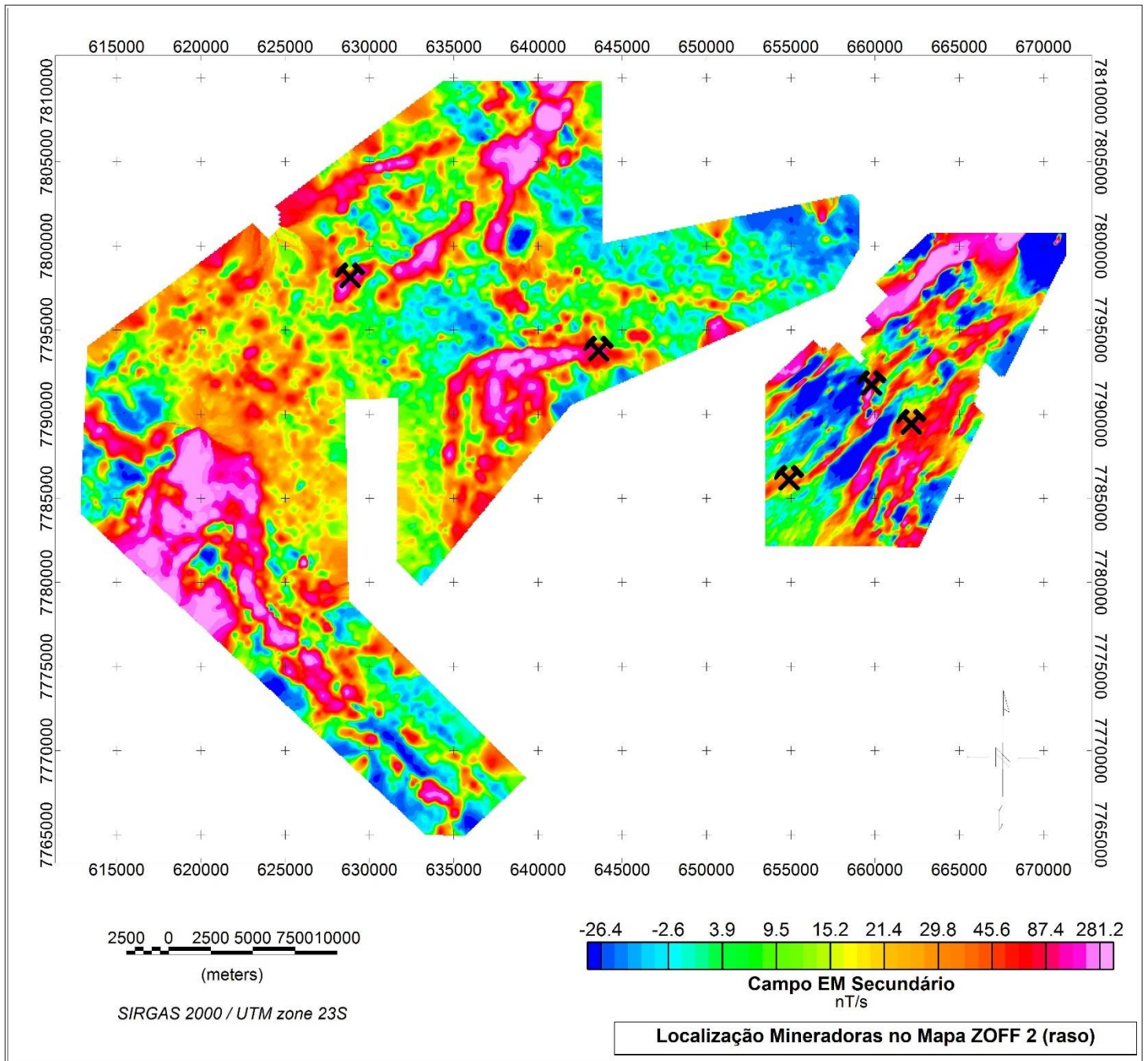


Figura 6. Imagem do campo magnético secundário off-time do canal 2, de profundidade rasa. As mineradoras de ouro da região são destacadas com o símbolo ⚒.

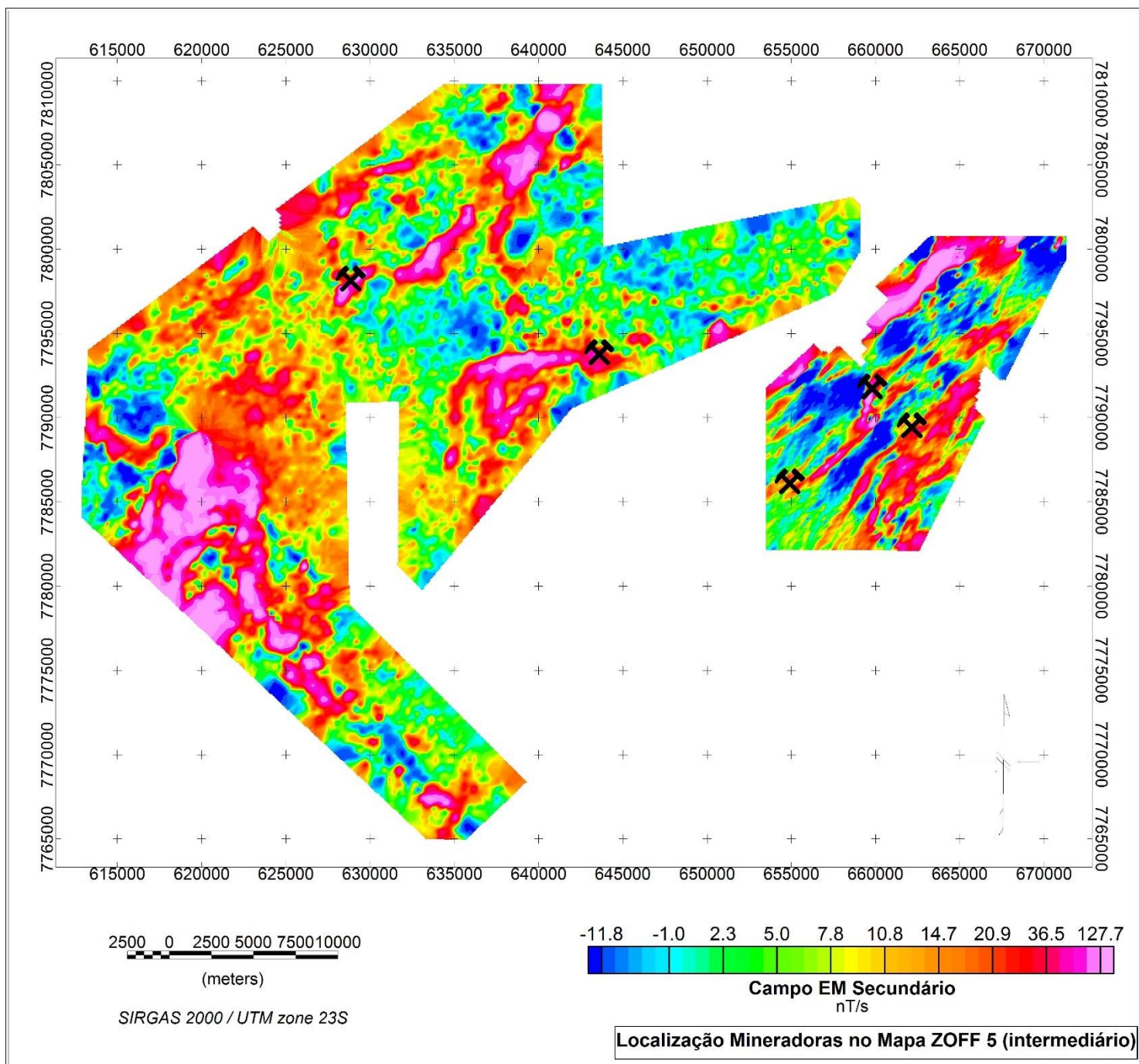


Figura 7. Imagem do campo magnético secundário off-time do canal 5, de profundidade intermediária. As mineradoras de ouro da região são destacadas com o símbolo ⚒.

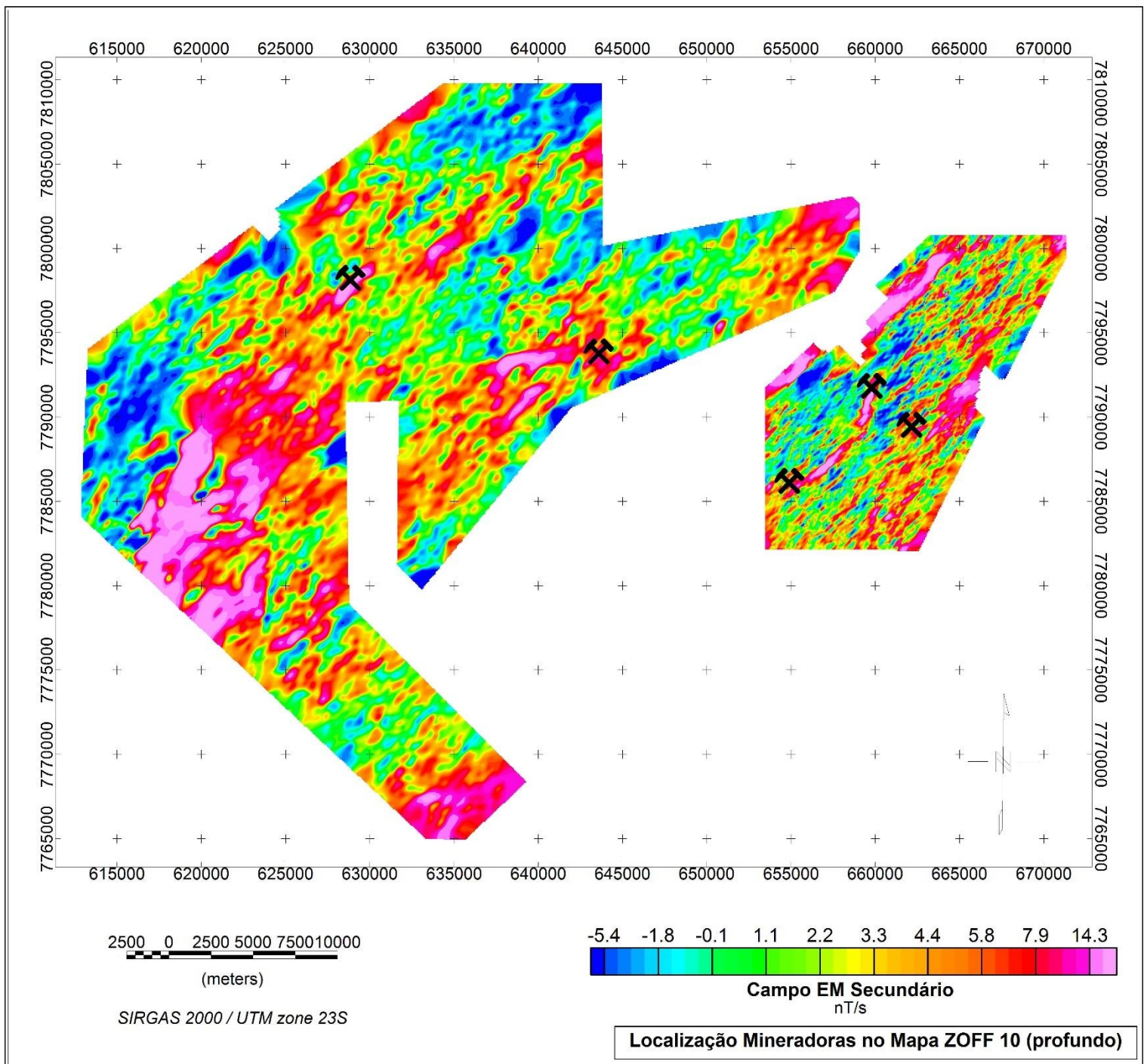


Figura 8. Imagem do campo magnético secundário off-time do canal 10, de maior profundidade.

As mineradoras de ouro da região são destacadas com o símbolo ⚒.

Para melhor visualização dos resultados, foi gerada uma imagem ternária para cada área (1 e 2), em que os dados de três canais são apresentados juntos na forma de uma imagem CMY (Ciano, Magenta e Yellow). Utilizando um canal raso (canal 2), um intermediário (canal 5) e um profundo (canal 10). Regiões que apresentam respostas de condutividades elevadas nos três canais simultaneamente, ou seja, estão presentes desde a área rasa até a profunda, irão compor a cor preta. Regiões com baixas amplitudes do campo EM secundário, nas três profundidades, geram a cor branca. Dessa forma, é possível analisar se os corpos condutores identificados são apenas superficiais, apenas profundos ou se estão tanto em superfície como em profundidade. As duas áreas foram juntadas usando operações *booleanas XOR* saída com malha de tamanho máximo (figura 9).

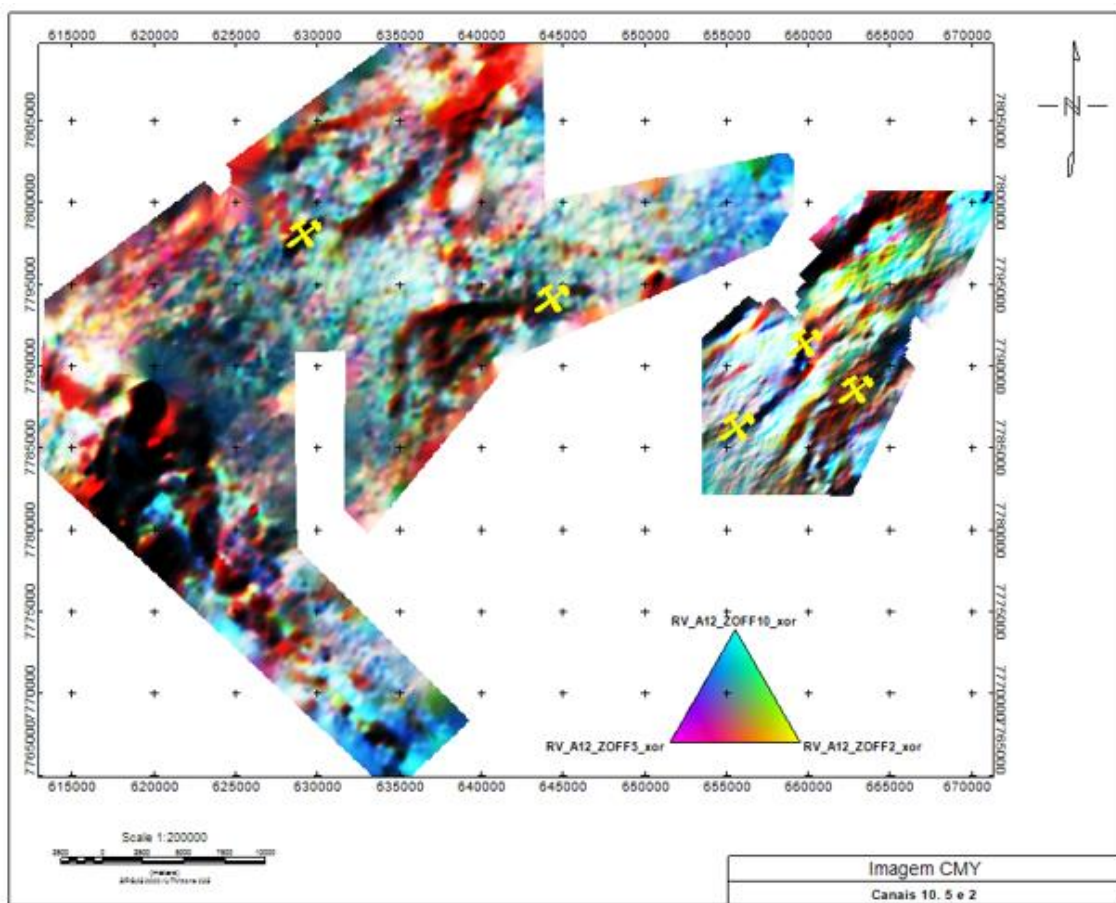


Figura 9. Imagem CMY (Ciano, Magenta e Yellow), canal profundo (cor ciano), intermediário (magenta) e raso (amarelo/yellow). As mineradoras com o símbolo ✕ em amarelo.

4.4 Produtos Semi-quantitativos

Após o processamento qualitativo dos dados, estes foram exportados do (Geosoft, 2020) e importados no ImagEM que seguiu com a inversão dos dados. Este software realiza a inversão 1D utilizando o método de Newton-Raphson, no cálculo da condutividade e baseia-se na equação de Eaton & Hohmann, 1989, para calcular a profundidade descrita na seção 3 (Travaglia, 2016).

Com os resultados da condutividade e da profundidade obtidos pelo ImagEM, os dados foram importados no Oasis Montaj onde foi obtida uma imagem 3D (VOXEL - **figura 10**). O método de interpolação utilizado foi *Krigging* e as malhas foram: 70 na direção xy e 20 na direção z.

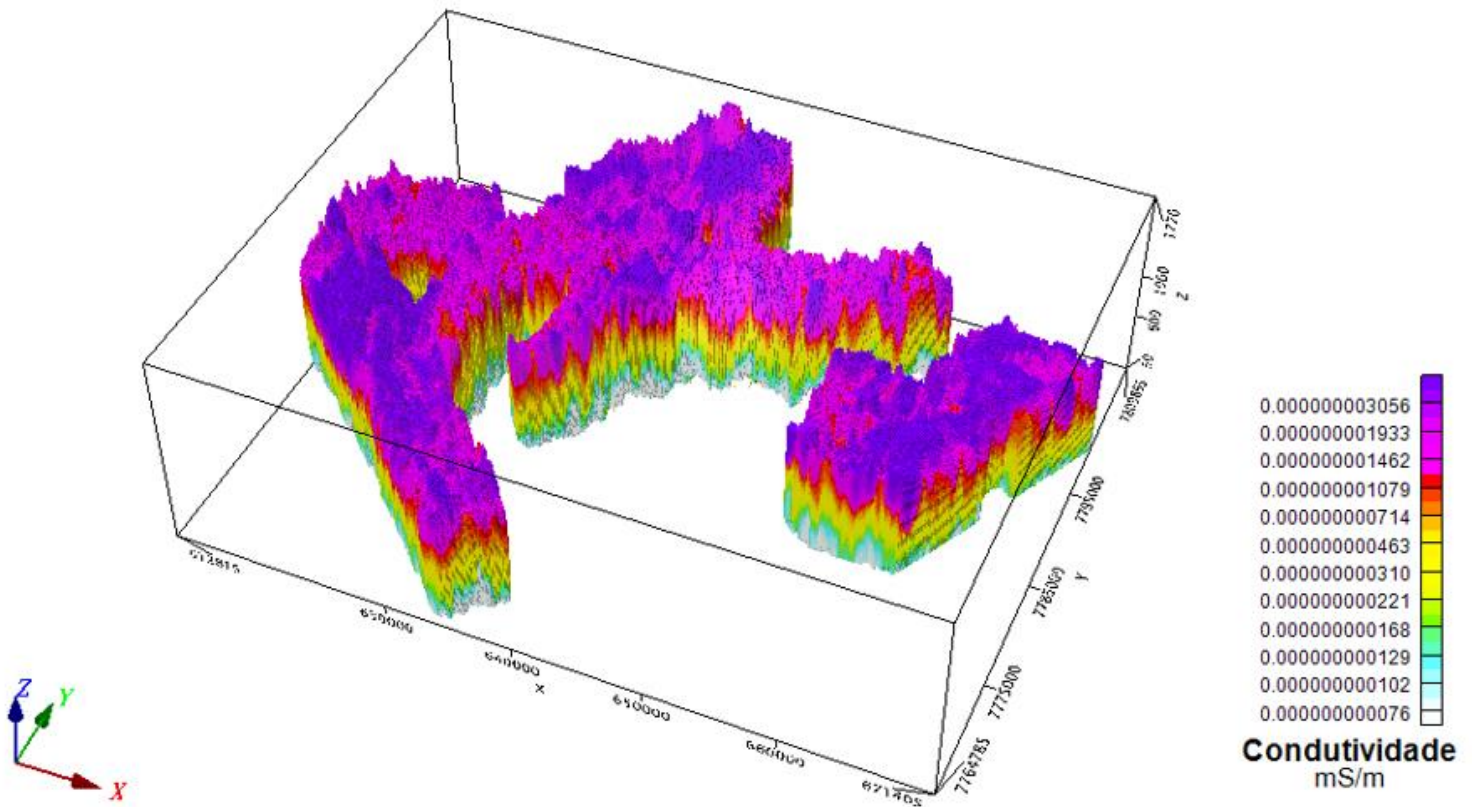


Figura 10. Mapa VOXEL das duas áreas de estudo.

Uma vez que ao longo das linhas de voo os dados estão espaçados a cada 250 metros, quando fazemos o VOXEL existe a perda de resolução, assim foi realizada uma CDI (*Conductivity Depth Image*) para cada linha do levantamento e foi gerado o mosaico com uma amostragem a cada 10 linhas (**figura 11**). Totalizando 33 CDIs para a área 1 e 11 para a área 2. O método de interpolação foi curvatura mínima e a malha foi de 10 metros.

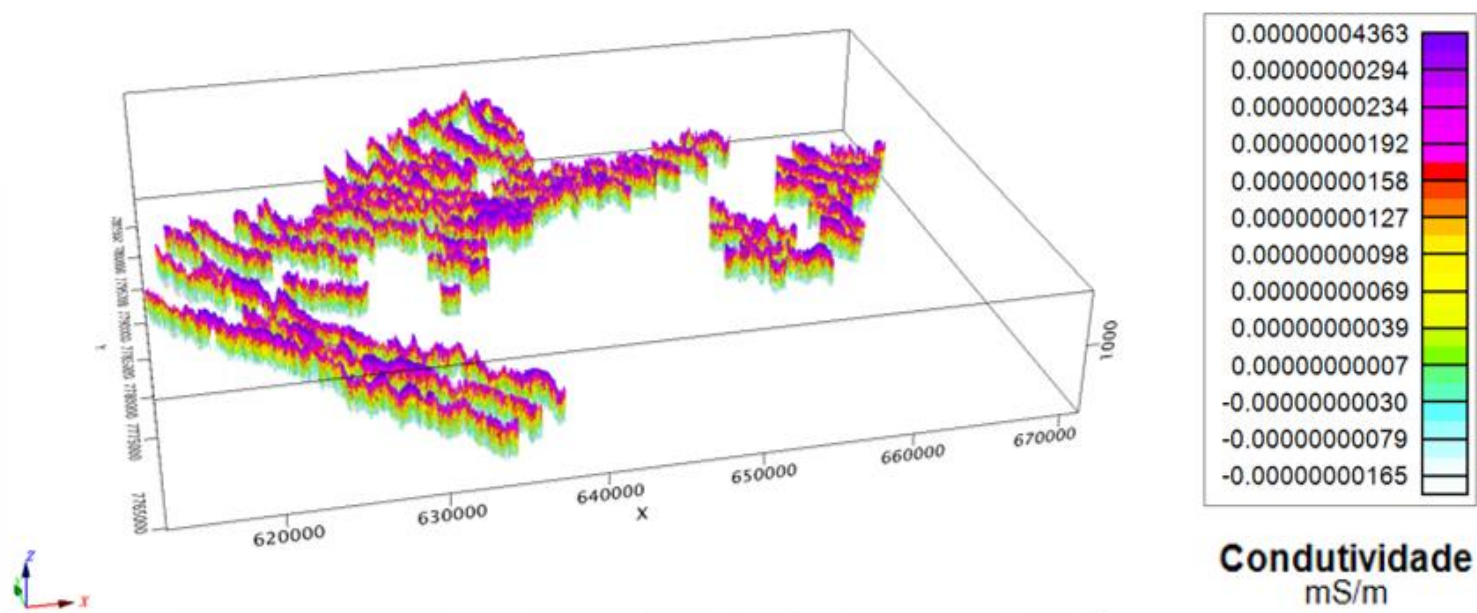


Figura 11. Vista em 3D das CDIs amostradas a cada 10, totalizando 44 CDIs das áreas 1 e 2.

5. Análise e Interpretação

5.1 Análise Qualitativa

Foram identificadas as estruturas rasas e profundas utilizando os canais 2,5 e 10 e a imagem CMY. Desta forma obteve-se a interpretação das estruturas condutivas rasas (amarela) e profundas (rosa) (**figura 12**).

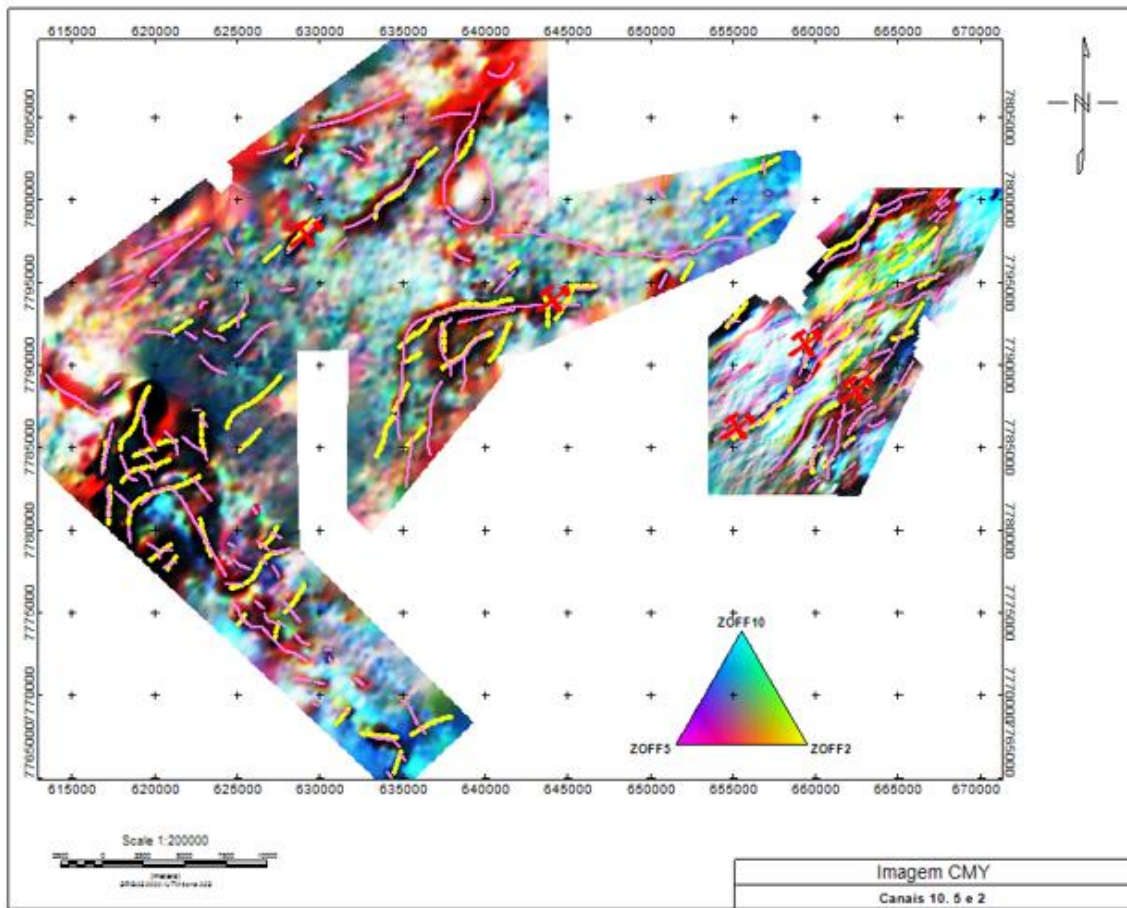


Figura 12. Imagem CMY em conjunto com as estruturas condutivas. Estruturas amarelas referentes ao campo secundário do canal 2 (mais raso) e estruturas rosas referentes ao canal 10 (mais profundo). As mineradoras com o símbolo ⚡ em vermelho.

Na área 1, a roseta (**figura 13**) mostra que a direção preferencial está em torno de 111 SE/NW e que as estruturas secundárias estão em E-W e 45 NE/SW. Observamos ao sul estruturas rasas, com direção NW/SE e profundas com direção NE/SW, e na borda noroeste temos a presença de estruturas predominantemente rasas (**figura 12**). Destaca-se também uma estrutura circular e outra linear na parte central superior da área 1. Na borda leste da área 1 observa-se estruturas rasas e profundas com concavidade para SE.

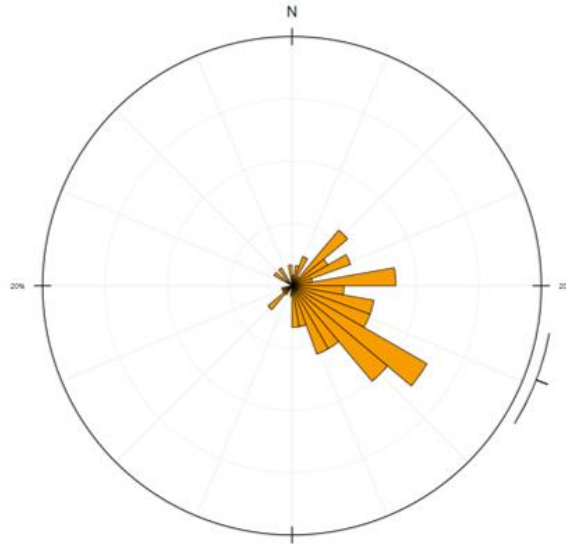


Figura 13. Roseta das estruturas condutivas rasas e profundas da área 1. Direção média $111^{\circ} \pm 10.7^{\circ}$ SE/NW. Número de amostras: 120.

A área 2 mostra em sua maioria estruturas alongadas, distribuídas em várias profundidades, desde rasas até profundas, e a roseta (**figura 14**) indica uma direção preferencial de 45 NE/SW.

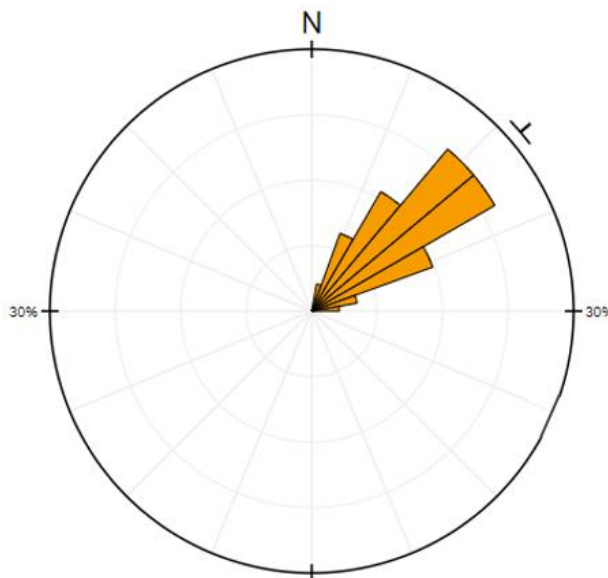


Figura 14. Roseta das estruturas condutivas rasas e profundas da área 2. Direção média $49.4^{\circ} \pm 3.2^{\circ}$ NE/SW. Número de amostras: 95.

Comparando a localização das mineradoras com o mapa CMY, é possível verificar que estas mineradoras estão localizadas em regiões de coloração preta, o que indica que são regiões de elevada condutividade em profundidades de rasa a mais profunda, em especial as duas mineradoras na região 1.

5.2 Análise Semi-quantitativa

Foram estudadas 4 CDIs (**figura 15**), duas em cada uma das áreas, localizadas próximas de grandes anomalias condutivas e das mineradoras da região. As linhas escolhidas foram: L20840:114 e L21120:106, na área 1; L30140:78 e L30442:87, na área 2. As CDIs a seguir apresentam os dados na direção SE-NW, seguindo as linhas de voo do levantamento.

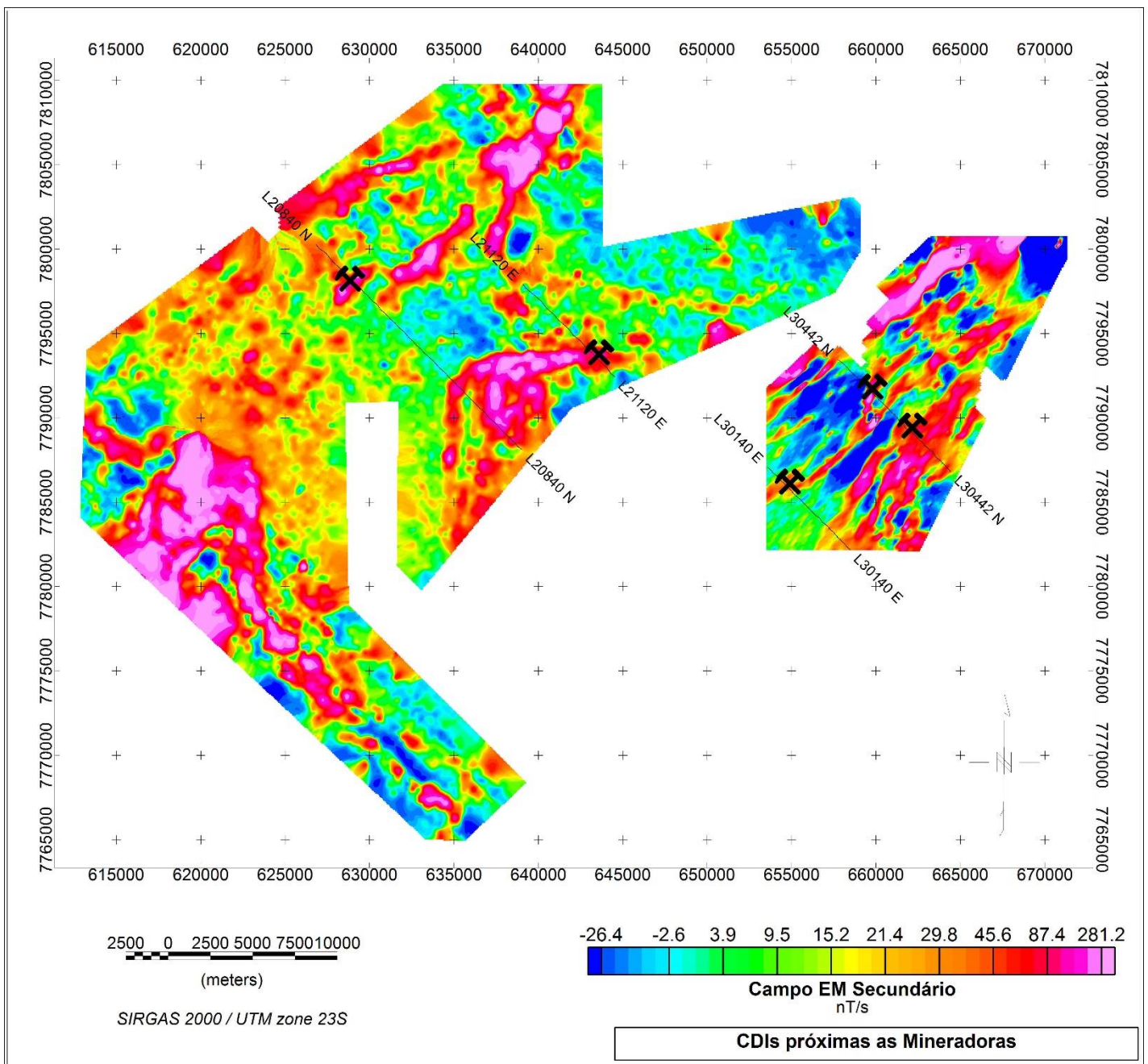


Figura 15. Mapa com as linhas de levantamento escolhidas (em preto) em comparação com o ZOFF2 (mais raso) e mineradoras.

No geral, as CDIs apresentam uma cobertura condutiva e conforme aumenta a profundidade diminui a condutividade. As CDIs acompanham aproximadamente os perfis do campo secundário e pode se notar que alvos condutivos mais profundos correspondem as maiores anomalias do campo secundário (**figuras 16 a 19**).

A CDI da linha 20840:114 (**figura 16**) mostra que a região onde está a mineradora apresenta alta condutividade, tanto rasa quanto profunda, atingindo 310 m de espessura, sendo 80 m de capa condutora e possui direção NE/SW (**figura 15**).

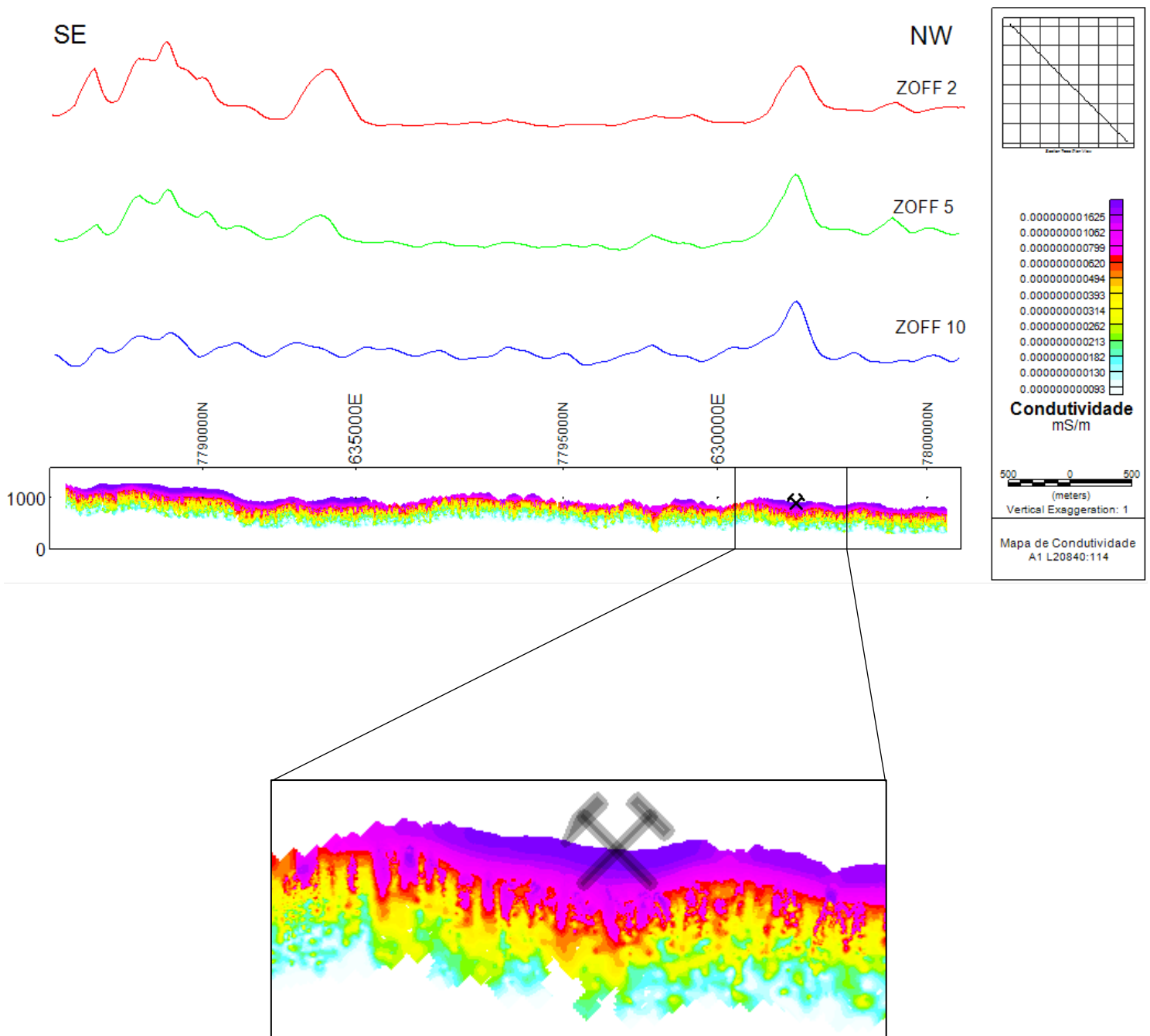


Figura 16. CDI da área 1, linha 20840:114, direção SE-NW. Os perfis acima da CDI representam os ZOFF2, ZOFF5 e ZOFF10. Com a localização da mineradora. Abaixo um zoom dá área onde se encontra a mineradora.

A CDI da linha 21120:106 (**figura 17**) apresenta uma região condutiva extensa (entre 644000E e 643000E, com cerca de 2 km) com espessura de até 290 m. A mineradora encontra-se na extremidade norte de uma estrutura condutiva (**figura 15**) com forma característica e nesse ponto a profundidade da parte condutiva é máxima.

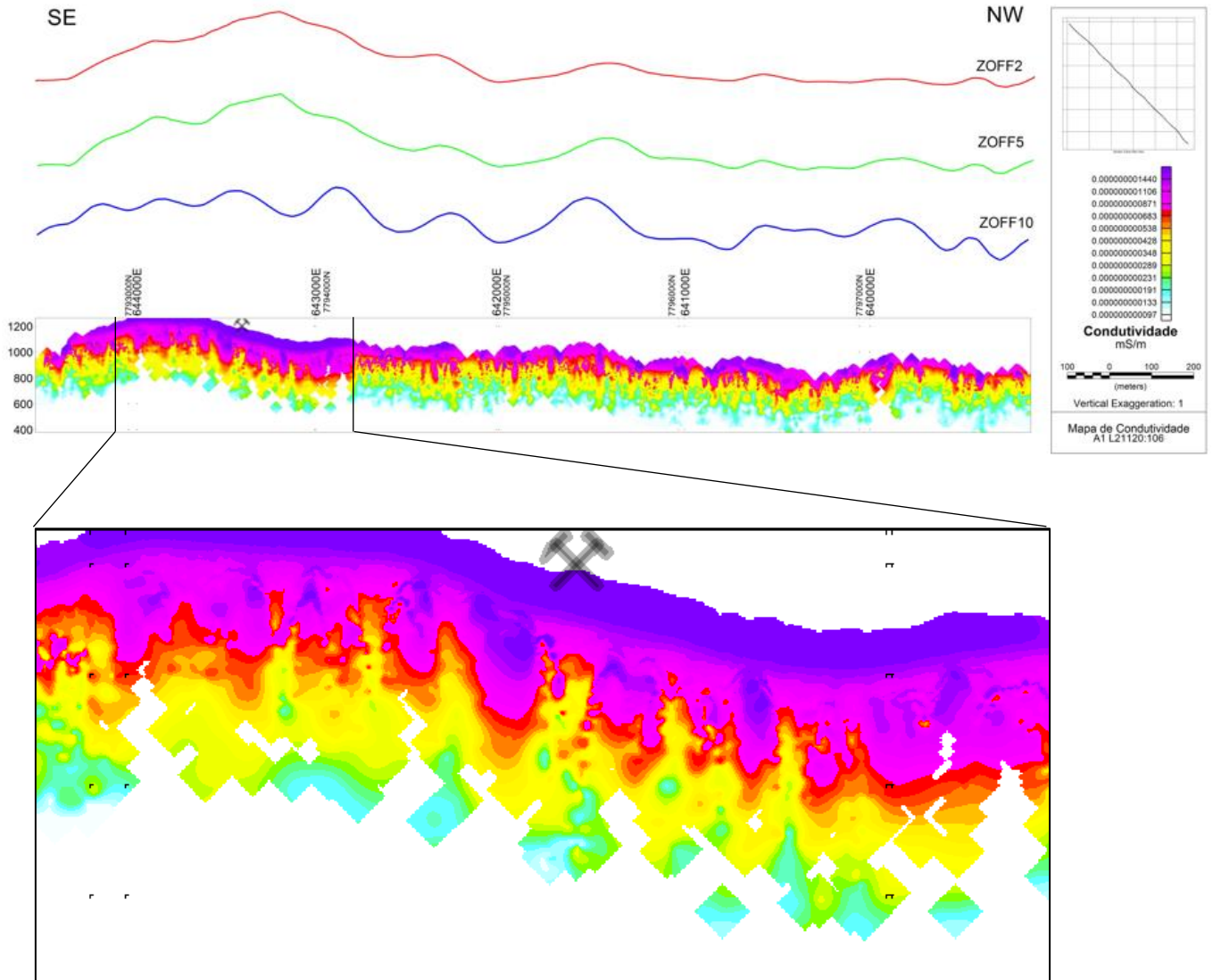


Figura 17. CDI da área 1, linha 21120:106, direção SE-NW. Os perfis acima da CDI representam os ZOFF2, ZOFF5 e ZOFF10. Com a localização da mineradora. Abaixo um zoom da área em que se encontra a mineradora.

Na área 2, a linha L30140:78 que passa próxima à mineradora (**figura 18**) apresenta três áreas condutivas com espessuras superiores a 300 m e uma capa de condutividade em torno de 4 pS/m, atingindo 100 m de espessura. Próxima a mineradora observa-se corpos de maior condutividade na cota de 500 m de profundidade (**figura 18**), o mesmo se repete nas outras áreas condutivas.

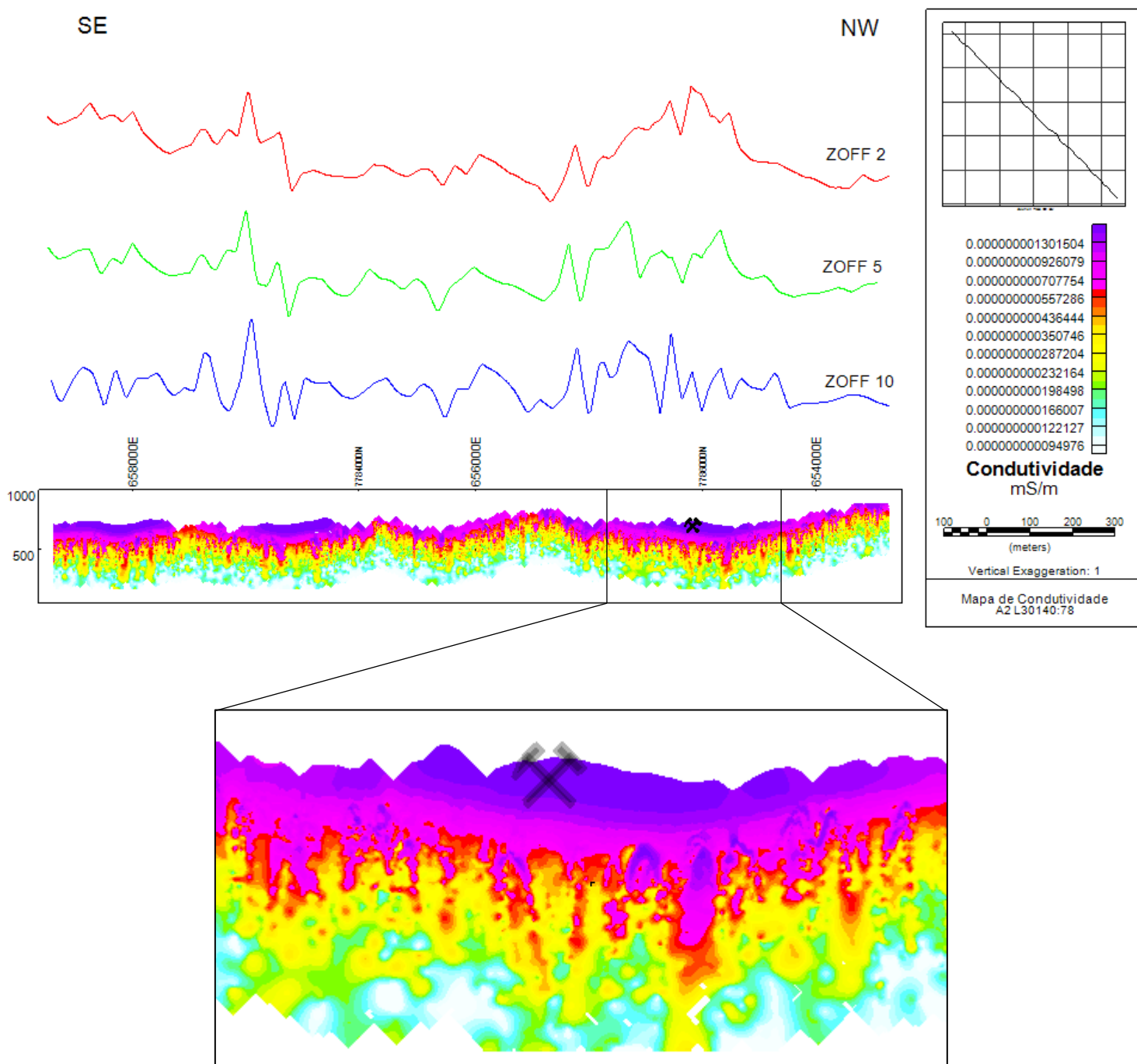


Figura 18. CDI da área 2, linha 30140:78, direção SE-NW. Os perfis acima da CDI representam os ZOFF2, ZOFF5 e ZOFF10. Com a localização da mineradora. Abaixo um zoom da área em que se encontra a mineradora.

Na linha L30442:78 (**figura 19**), a região próxima a mineradora a SE apresenta área condutiva com extensão de cerca de 2 km, com profundidade da maior condutividade em torno de 150 m e em algumas áreas chega a 300 m. A região da mineradora a NW tem uma extensão de 750 m, e a espessura da área condutiva atinge até 300 m.

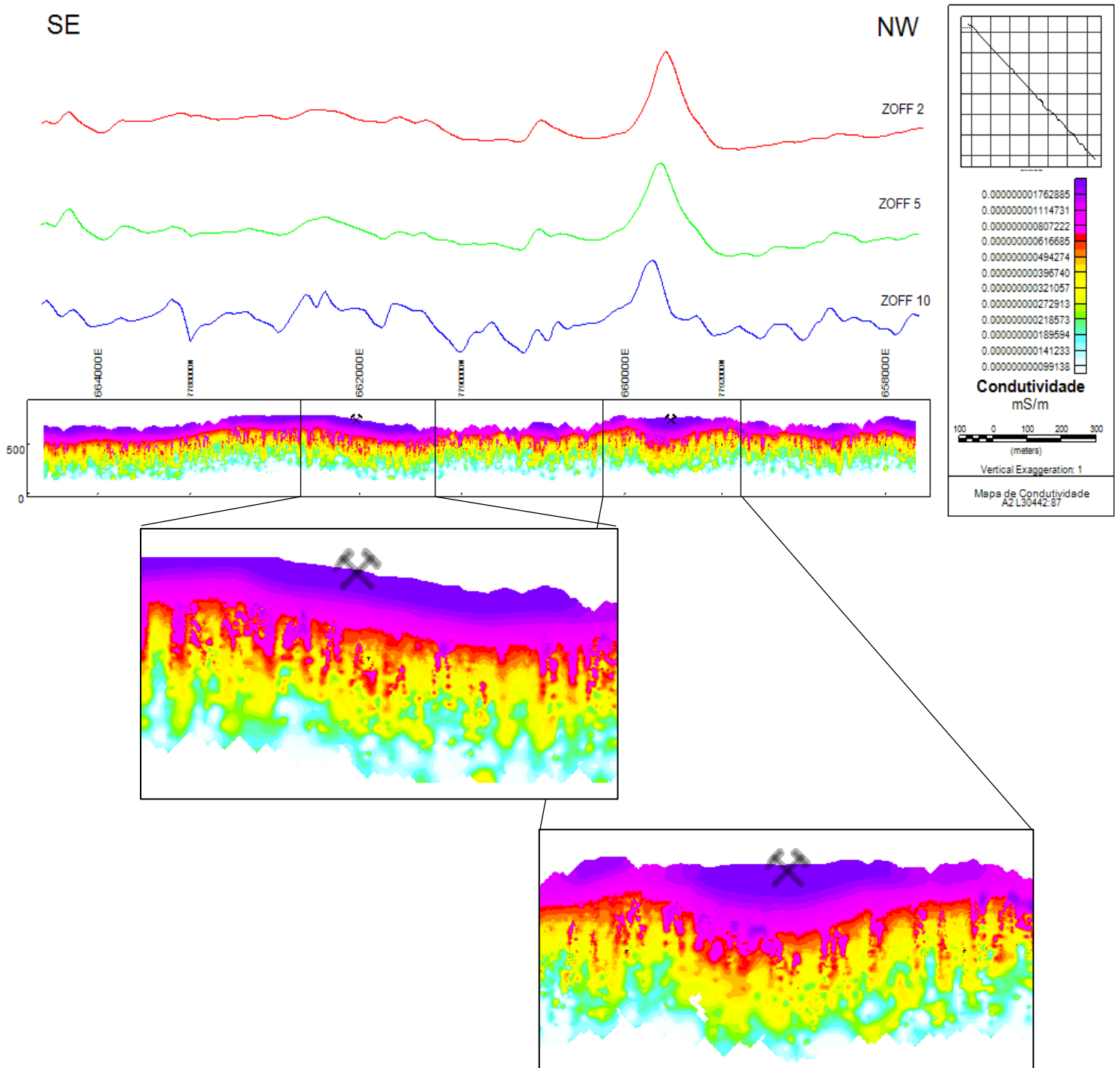


Figura 19. CDI da área 2, linha 30442:78, direção SE-NW. Os perfis acima da CDI representam os ZOFF2, ZOFF5 e ZOFF10. Com a localização das mineradoras. Abaixo um zoom das áreas em que se encontram as mineradoras.

Foram geradas cinco isosuperfícies das áreas para destacar as áreas condutivas (**figuras 20, 21 e 22**). Com a **figura 22** representando a isosuperfície mais condutiva em vermelho destacada.

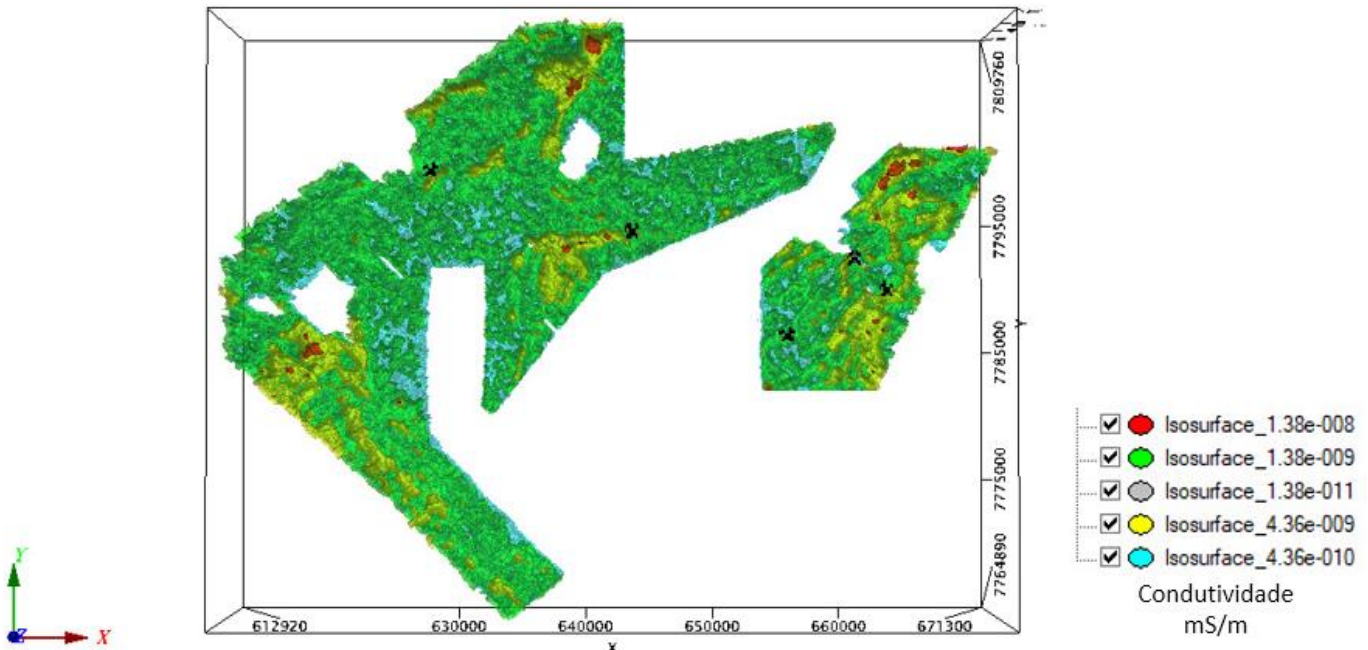


Figura 20. Vista de cima da imagem das cinco isosuperfícies geradas na região, com as mineradoras em preto.

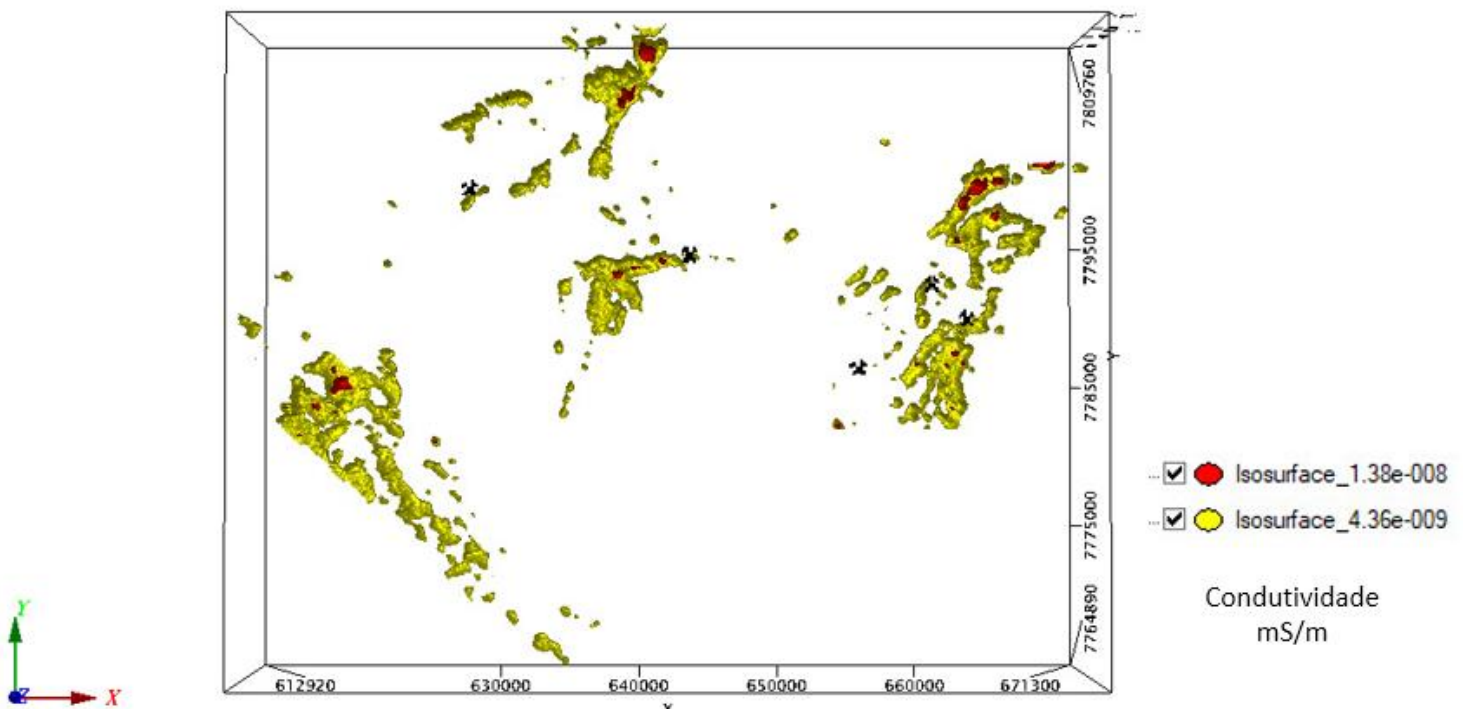


Figura 21. Vista de cima da imagem das duas isosuperfícies mais condutivas (amarelo e vermelho), com as mineradoras em preto.

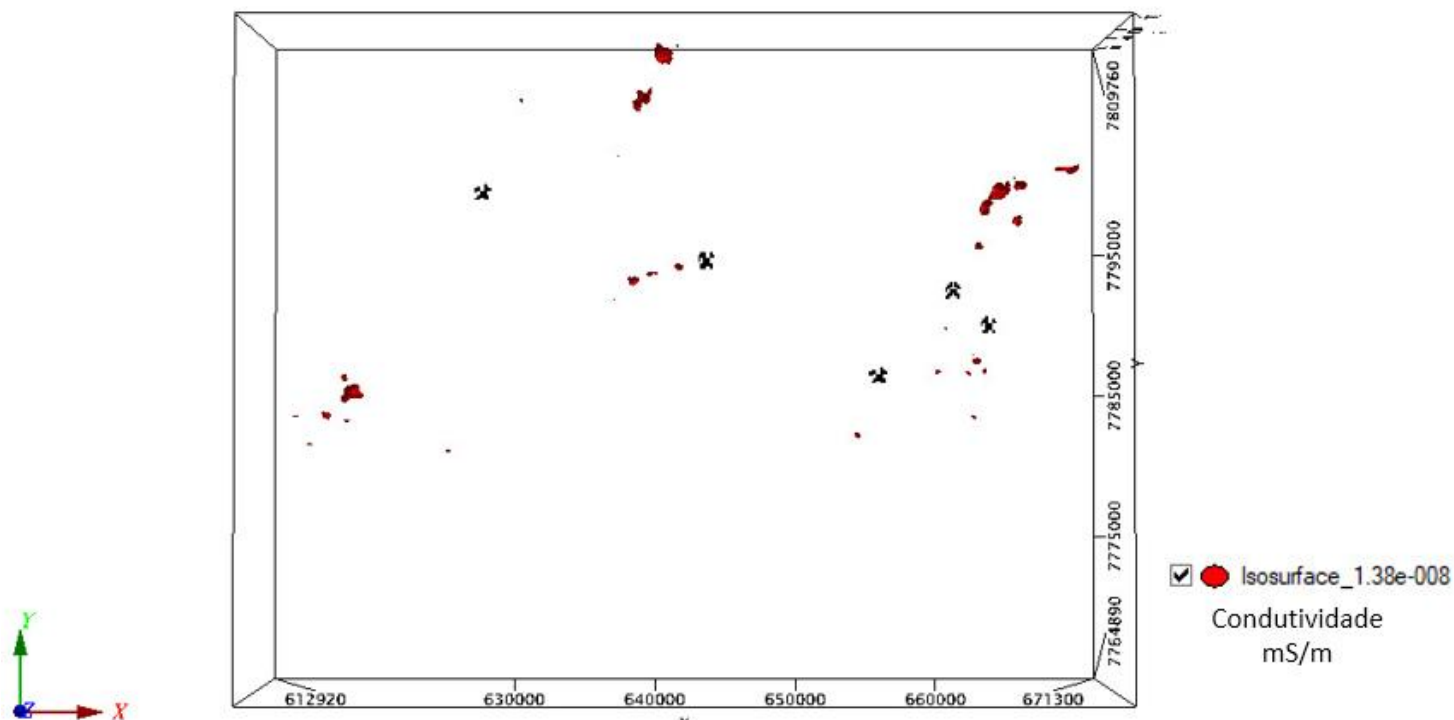
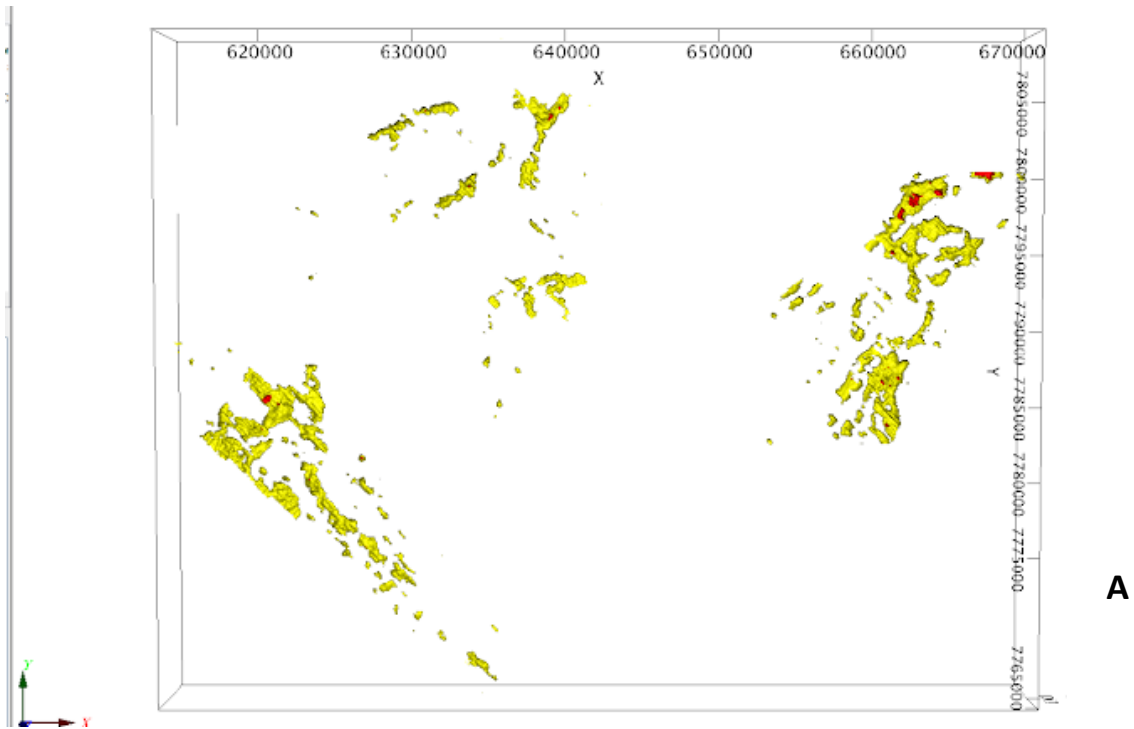
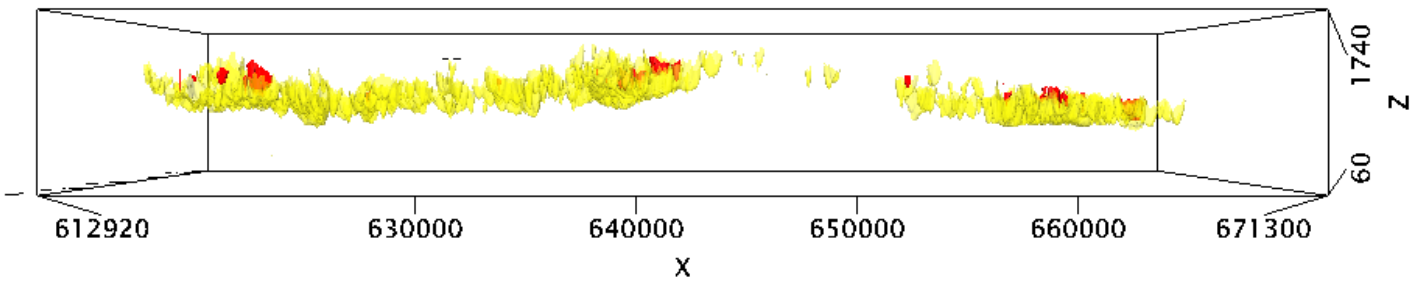


Figura 22. Vista de cima da imagem da isosuperfície mais condutiva (vermelho), com as mineradoras em preto.

A **figura 23** mostra as isosuperfícies com condutividade 4,36 nS/m (amarelo) e 13,8 nS/m (vermelho). A figura A é uma vista de cima das isosuperfícies, destacando a alta favorabilidade a mineração; e a figura B é a vista frontal plano (x,y) das isosuperfícies. A **figura 24** mostra as vistas de cima (plano x,y) para as cotas em z, variando de **figura 24**: A) 586 a 1500 m; B) 586 a 1000 m; C) 586 a 800 m e D) 586 a 700 m. Observa-se que as fontes mais profundas encontram-se na área 2 e ao sul da área 1, principalmente com relação à isosuperfície vermelha. A figura 25 mostra as mesmas isosuperfícies **da figura 24** com a imagem CMY no plano (x,y), servindo para confrontar o produto da inversão com a imagem qualitativa CMY do campo secundário de três canais que se obtém diretamente do receptor. Nota-se uma coincidência das isosuperfícies amarelas com a área de cor preta da imagem CMY (fontes rasas a profundas: 1000 a 586 m) além da sobreposição de pequenas áreas vermelhas (fontes intermediárias) e azuis (fontes profundas: de 700 a 586 m).



A



B

Figura 23. Isosuperfícies com condutividades 4,36nS/m (amarelo) e 13,8nS/m (vermelho), os cilindros pretos são as mineradoras. A) Vista de cima, B) vista das isosuperfícies com inclinação e azimute 0.

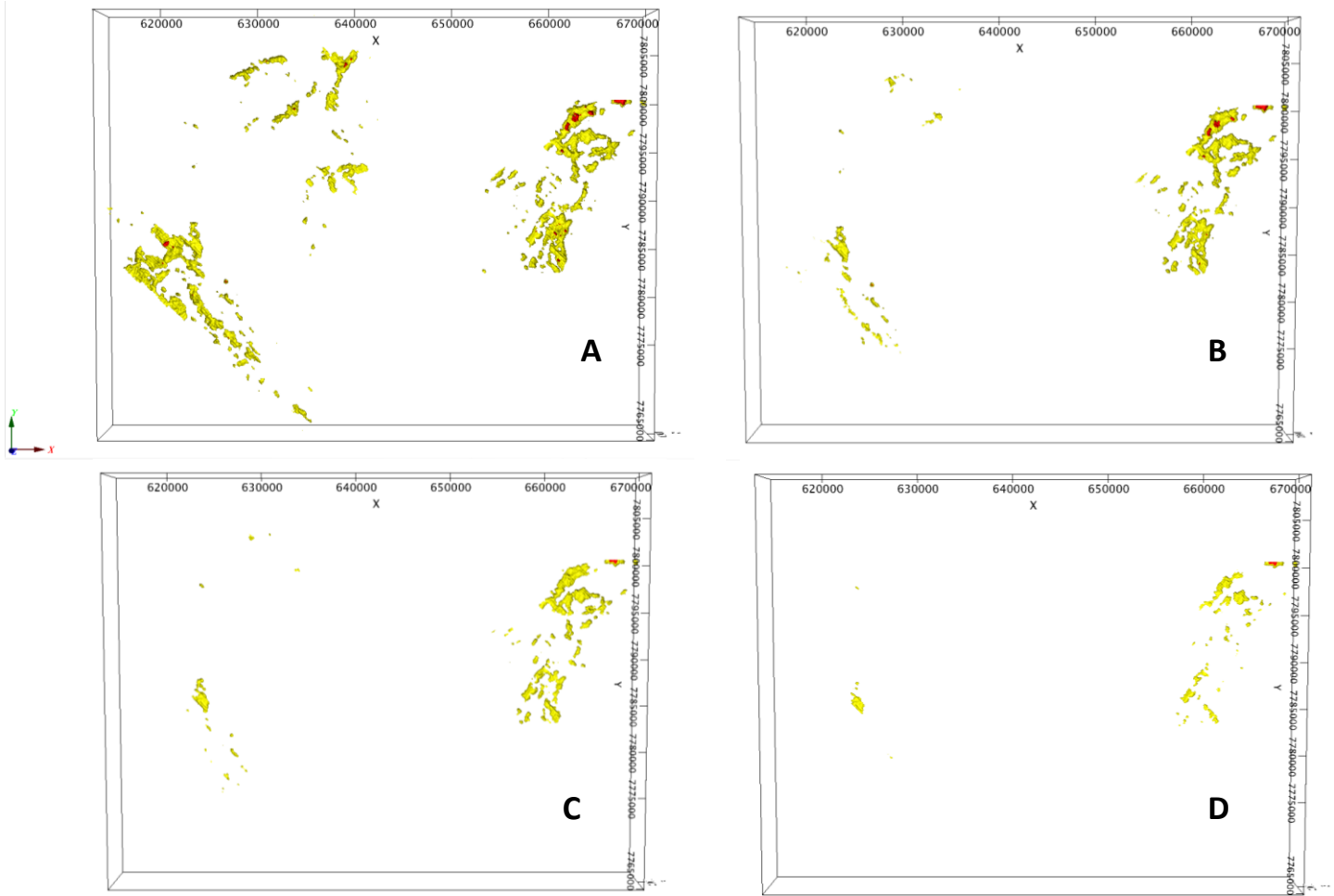


Figura 24. Vistas de cima das isosuperfícies com condutividades 4,36nS/m (amarelo) e 13,8nS/m (vermelho) para as cotas variando de A) 1500 a 576; B) 1000 a 586m; C) 800 a 586m e D) 700 a 586m.

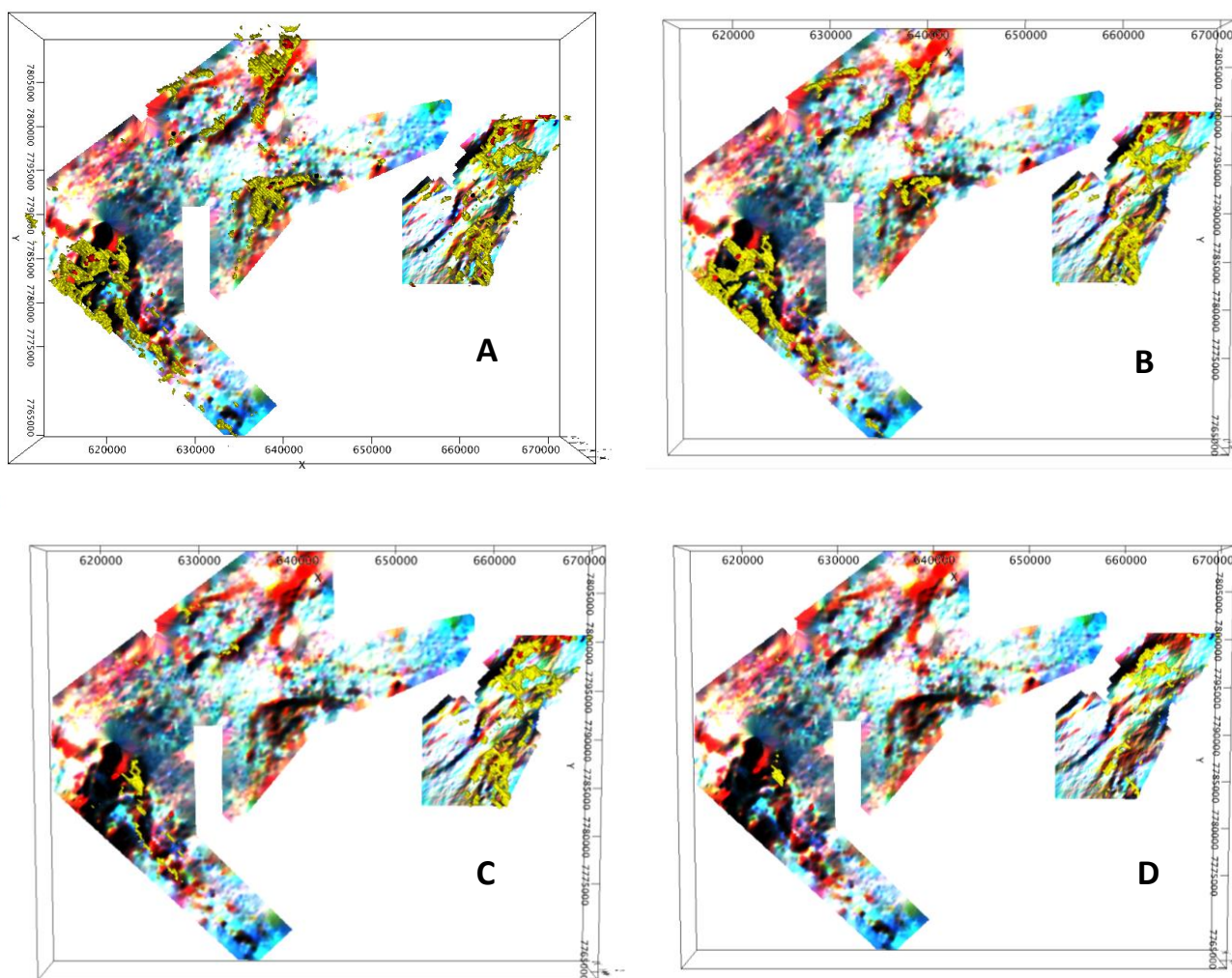


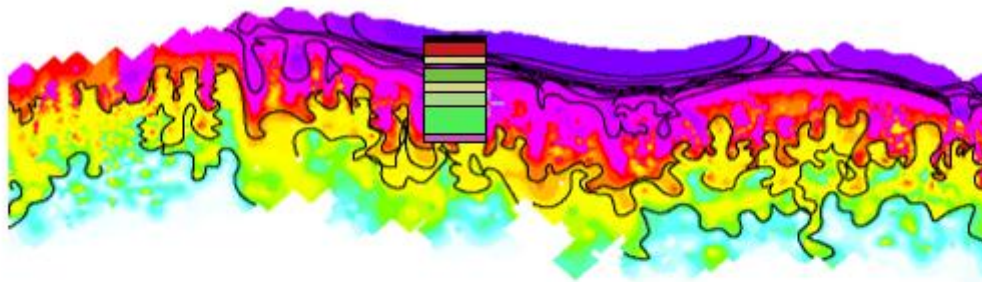
Figura 25. Vistas de cima dos mapas CMY em comparação com as isosuperfícies com condutividades 4,36nS/m (amarelo) e 13,8nS/m (vermelho) para as cotas variando de A) 1500 a 576; B) 1000 a 586m; C) 800 a 586m e D) 700 a 586m.

6. Discussão e Conclusão

O Depósito de ouro da área em estudo originou-se dos eventos de metamorfismo e deformação do *Greenstone* Rio das Velhas durante o Arqueano, os quais afetaram o grupo Nova Lima (**Figura 2**). Essas mineralizações presentes têm um forte controle estrutural associado com lineamentos e zonas cisalhantes. Os depósitos são estruturalmente controlados e estão associados a alterações hidrotermais ao longo das falhas cisalhantes de direção regional NW-SE (Baltazar & Zuchetti, 2007). Nesta pesquisa os lineamentos condutivos observados ao sul da área 1 teve direção predominante 111° NW-SE; e em zonas de cisalhamento dúctil-rúptil de direção NE-SW, como observado nas estruturas condutivas da área 2 e ao norte da área 1 (**figuras 12, 13 e 14**).

Com o processamento dos dados do campo eletromagnético secundário foram gerados perfis de condutividade aparente por profundidade (CDIs). As CDIs acompanham aproximadamente os perfis do campo secundário e pode se notar que alvos condutivos mais espessos correspondem as maiores anomalias do campo secundário. No geral, as CDIs apresentam uma cobertura condutiva e conforme aumenta a profundidade diminui a condutividade. Mas pode-se observar em alguns pontos das CDIs pequenas áreas condutivas em profundidade com extensão variando de dezenas de metros a 2 km.

Destacamos para análise a mina de Lamego, que tem sua importância por ser uma jazida de ouro orogênico do Arqueano, dentro das rochas do Greenstone Belt do Rio das Velhas. Litologicamente, caracteriza-se por uma sequência Vulcano-sedimentar metamorfoseada composta por unidades máficas, com a presença de BIFs (formação ferrífera) e xistos carbonáceos/micáceos. Esta mina foi apresentada na **Figura 16** linha 20840:114, no contexto de uma estrutura rasa condutiva de direção NE/SW. A **Figura 26** mostra uma sequência litológica típica da área da mina de Lamego sobreposta a parte da CDI da Linha 20840, onde os primeiros 100 metros (área condutiva) apresenta-se as seguintes camadas: o solo, BIFs, metapelito e micaxisto e metadiabásio, nos próximos 150 metros temos como litologia metabasalto/metandesito com intervalo de cloritização e metapelito (Couto, 2021), região da CDI com variação da condutividade de alta a muito alta (vermelho a roxo).



Legenda da litologia do furo de sondagem próximo a área da mina de Lamego

	Solo
	BIF – Representa a formação bandada de Ferro
	Metapelito, micaxisto
	Metadiabásio
	Metabasalto/metandesito
	Intervalo com clorotização no metabasalto/metandesito
	Metapelito enriquecido com carbonato

Figura 26. Sobreposição do zoom da CDI 20840, na região da Mina Lamego com a litologia obtida do borehole (Couto, 2021; Martins *et al.*, 2016).

A direção NE/SW e a alta espessura condutiva podem servir como guia estrutural e litológico (litologia condutiva) para a mineralização de ouro.

Finalizamos a discussão propondo como área de alta favorabilidade para ouro a intersecção da isosuperfície amarela e vermelha com as áreas pretas da imagem do CMY (**Figura 25A**). Além da sobreposição da área azul da imagem CMY com a isosuperfície amarela/vermelha, onde mostra alvos mais profundos entre 586 e 700 m, ao norte da área 2. Destaca-se também que a área 2 e a parte sul da área 1 apresentam alvos mais profundos, cotas 700 a 586 m.

Vislumbrando a continuidade da pesquisa, indicamos a integração dos resultados de eletromagnetometria apresentados aqui com os resultados de magnetometria que foram obtidos em meu PIBIC.

7. Referências

Alkmim, F. F. & Marshak, S. (1998). *Transamazonian Orogeny in the Southern São Francisco Craton Region, Minas Gerais Brazil: Evidence for a Paleoproterozoic collision and collapse in Quadrilátero Ferrífero*. *Precamb. Res.*, 90: 29- 58.

Alkmim, F. F. & Noce, C. M. (2006). *The Paleoproterozoic Record of the São Francisco Craton*. IGCP 509 Field workshop, Bahia e Minas Gerais, Brasil. Field Guide & Abstracts, p. 114.

Baltazar, O. & M. Zucchetti. (2007). *Lithofacies associations and structural evolution of the archean Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero, Brazil: A review of the setting of gold deposits*. *Ore Geology Reviews*, 32: 471–499.

Condie, K. C. (1981). *Archean greenstone belts*: Elsevier, 3. Série: Developments in Precambrian Geology. 1a. edição. Ebook ISBN: 9780080869025.

Couto, M.A. (2021). *Gold Deposits Investigation in Quadrilátero Ferrífero, MG, Brazil by The Analysis of HTEM DATA*. USP – IAG.

CPRM - Serviço Geológico do Brasil (2012). Projeto Aerogeofísico Rio das Velhas - Etapa II. Relatório Final do Levantamento e Processamento dos Dados Magnetométricos e Eletromagnetométricos. Prospectors Aerolevantamentos e Sistemas LTDA.

Dardenne, M. A.; C. Schobbenhaus. (2001). *Metalogênese do Brasil*: UNB. CPRM.

Dorr, J. V. N. (1969). *Physiographic, stratigraphic and structural development of Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil*. USGS. Prof. Paper, 641-A, 110 p, Washington.

Eaton, P. A. & Hohmann, G. W. (1989). *A Rapid Inversion Technique for Transient Electromagnetic Soundings. Physics of the Earth Planetary Interiors*, 53: 384-404.

Font, E. (2016). *Geophysics Courses (PT Version): Métodos Elétricos e Eletromagnéticos*. Universidade de Lisboa, Campo Grande. Website: <http://webpages.fc.ul.pt/~ecfont/>

Frischkenecht, F. C. & Raab, P. V. (1984). *Time Domain Electromagnetic Soundings at the Nevada Test Site. Geophysics*, 49: 981-992.

GEOSOFT (2020). *Montaj Geophysics Levelling System: Tutorial and User Guide*. www.geosoft.com. Toronto, Canada.

Goldfarb, R.J. & Groves, D.I. (2015). *Orogenic gold: Common or evolving fluid and metal sources through time*. *Lithos*, 233: 2–26

Gomes, M. J. S. (2003). *Utilização de métodos geofísicos em sambaquis fluviais, região do Vale do Ribeira de Iguape - SP/PR*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo. doi:10.11606/D.8.2003.tde-31032004-104614.

Ley-Cooper, A. Y. (2017). *Groundwater Geophysics in Hard Rock*. *Preview*, 186: 41. Ebook ISBN: 9780415664639.

Lobato L.M.; Ribeiro-Rodrigues L.C.; Vieira F.W.R. (2001). *Brazil's premier gold province: Part II. Geology and genesis of gold deposits in the Archean Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero*. *Mineralium Deposita*, 36: 249-277.

Martins, B. S.; Lobato, L. M.; Rosière, C. A; Hagemann, S. G.; Santos, J. O. S; Villanova, F. L. S. P.; Figueiredo e Silva, R. C.; Ávila Lemos, L. H. (2016). *The Archean BIF-hosted Lamego Gold Deposit, Rio das Velhas Greestone Belt, Quadrilátero Ferrífero: Evidence*

for cambrian structural modification of Archean Orogenic Gold Deposit. Ore Geology Reviews, 72: 963-988.

Nabighian, M. N.; Macnae, C. J. (1987a). *Electromagnetic Theory for Geophysical Applications. In Nabighian, M.N. Ed, Electromagnetic Methods in Applied Geophysics, v. 1, Theory, Investigations in geophysics, SEG, 203-252.*

Nabighian, M. N.; Macnae, C. J. (1987b). *Time Domain Electromagnetic Prospecting Methods. In Nabighian, M.N. Ed, Electromagnetic Methods in Applied Geophysics, v. 1, Theory, Investigations in geophysics, SEG, 427-520.*

Nabighian M.N.; Macnae J.M. (2005). *Electrical and EM methods, 1980- 2005. SEG75, 42-45.*

Ogilvy, R.D.; Lee, A.C. (1991). *Interpretation of vlf-em in-phase data using current density pseudosections. Geophys. Prospect. 39: 567-580.*

Reford, S.; Kwan, K.; Nyakaana, J.; Kutumwehe, A.; Wane, O. (2009). *Airborne Geophysics as a Tool to Promote Mineral Investments in Africa. ASEG209 – 20th Geophysical Conference.*

Silva A. M. (1999). *Geophysical and Geological Data Integration Using a New Statistical Approach for Mineral Target Selection Applied to the Rio das Velhas Greenstone Belt, Quadrilátero Ferrífero. Inst. of Geosciences, University of Brasília.*

Telford, W. M; Geldart, L. P.; Sheriff, R. E. (1990) *Applied Geophysics, Cambridge, England. University Press, 62-134.*

Travaglia, U. J. F. (2016). *ImagEM: Programa de modelagem 2d para dados TDEM. Universidade de Brasília.*

Von Huelsen, M. G. (2020). *Anotações das aulas do Método Eletromagnético. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília.*

Zakarewicz, G.; Lins, L.; Von Huelsen, M.; Justino, A. (2019). *Interpretação de Dados Aeroeletromagnéticos no Domínio do Tempo no Greenstone Belt Rio das Velhas. UnB, Instituto de Geociências.*