



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE GEOGRAFIA



FERNANDO AURELIO BERGAMASCO

**ESTUDO MAGNOTELÚRICO NA CARACTERIZAÇÃO GEOTECTÔNICA DO
NÚCLEO ARQUEANO CAMPO GRANDE-RN, NORDESTE DO BRASIL**

Monte Carmelo - MG

2024

FERNANDO AURELIO BERGAMASCO

**ESTUDO MAGNOTELÚRICO NA CARACTERIZAÇÃO GEOTECTÔNICA DO
NÚCLEO ARQUEANO CAMPO GRANDE-RN, NORDESTE DO BRASIL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Geologia do Instituto de Geografia da
Universidade Federal de Uberlândia, como parte
dos requisitos necessários à obtenção do título de
Bacharel em Geologia.

Orientador: Prof. Dr. Fabiano Mota da Silva

Monte Carmelo – MG

2024

FERNANDO AURELIO BERGAMASCO

**ESTUDO MAGNOTELÚRICO NA CARACTERIZAÇÃO GEOTECTÔNICA DO
NÚCLEO ARQUEANO CAMPO GRANDE-RN, NORDESTE DO BRASIL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Geologia do Instituto de Geografia da
Universidade Federal de Uberlândia, como parte
dos requisitos necessários à obtenção do título de
Bacharel em Geologia.

Área de concentração:

Monte Carmelo – MG, 2024

Banca Examinadora:

Fabiano Mota da Silva – Doutor (UFU)

Christiano Magine – Doutor (UFC)

Marcos César Soares de Queiroz – Mestre (UnB)

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

B493 2024	Bergamasco, Fernando Aurelio, 2001- ESTUDO MAGNOTELÚRICO NA CARACTERIZAÇÃO GEOTECTÔNICA DO NÚCLEO ARQUEANO CAMPO GRANDE-RN, NORDESTE DO BRASIL [recurso eletrônico] / Fernando Aurelio Bergamasco. - 2024. Orientador: Fabiano Mota da Silva. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Uberlândia, Graduação em Geologia. Modo de acesso: Internet. Inclui bibliografia. 1. Geologia. I. Silva, Fabiano Mota da, 2001-, (Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Graduação em Geologia. III. Título. CDU: 551
--------------	---

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074

AGRADECIMENTOS

Agradeço principalmente a minha família, minha mãe Rubia, meu padrasto Gian minha tia Rosi, meu Tio Osvaldo (Tatão), meus avós Fernando e Almina e aos demais familiares que me demonstraram apoio incondicional para alcançar meus objetivos. Sem vocês nada do que eu alcancei seria possível, obrigado por cada gesto de apoio e afeto que me incentivaram a continuar, mesmo em situações difíceis faziam o possível para me manter perseverante. Agradeço a vocês por tudo que me proporcionaram, esse diploma é tanto meu como de vocês.

Aos meus companheiros de república Leonardo (Milk), Olavo, João, Thiago (Meia Barba), Thalles (Carioca), Wandir, Dyego, Vitor e Lucas que compartilharam dificuldades e alegrias durante essa árdua trajetória.

A todos os amigos que me acompanharam e me ajudaram durante essa jornada, sou grato a vocês, cada momento, cada conversa, cada risada, foi especial e não será de maneira nenhuma esquecido.

Aos meus companheiros de estágio Lucas (Luketa), Gabriela (Gabi), Iago, João Paulo (Baiano), só vocês sabem os problemas e situações que passamos, obrigado pelo apoio, pelas risadas e momentos. Foi por pouco tempo, mas cada momento foi sensacional e com certeza vamos continuar a compartilhar momentos incríveis durante nossas jornadas profissionais.

Agradeço também aos meu orientador e amigo Fabio Motta da Silva que fez de tudo para me ajudar a alcançar esse diploma, criou diversas oportunidades para eu me desenvolver como geólogo e como pessoa. Agradeço também aos outros professores e técnicos que me acompanharam e transmitiram ensinamentos que vou levar para o resto da minha vida.

RESUMO

Este trabalho consiste em uma investigação geofísica magnetotelúrica das grandes estruturas presentes no Domínio Tectônico do Rio Grande do Norte, região Nordeste do Brasil, financiado pelo Instituto Nacional de Ciências e Tecnologia – Geotectônica (INCT-Geotec). Os principais objetivos são: realizar modelagem geolétrica a partir de dados magnetotelúricos, identificar corpos rochosos e estruturas em subsuperfície a partir do modelo obtido e realizar a integração dos dados geofísicos com dados geológicos. A metodologia empregada neste estudo abordou as seguintes etapas: a) revisão bibliográfica; b) aquisição de dados magnetotelúricos (MT); c) filtragem e exclusão de ruídos eletromagnéticos; d) cálculo do tensor impedância; e) inversão e obtenção do modelo final utilizando o código ModEM3D. O estudo identificou três feições elétricas principais: “R1”, “C1” e “C3”, que foram associadas a um complexo gnaiss migmatítico, anfibolitos e gnaisses anfibolíticos, respectivamente. Além disso, este estudo demonstrou a resposta das rochas à ação dextral das zonas de cisalhamento presentes na região.

Palavras-chave: Magnetotelúrico, Geotectônica, Modelagem e Inversão 3D.

ABSTRACT

This work consists of a magnetotelluric geophysical investigation of the large structures present in the Rio Grande do Norte Tectonic Domain, located in the Northeast region of Brazil, funded by the National Institute of Science and Technology – Geotectonics (INCT-Geotec). The main objectives are: to perform geoelectric modeling using magnetotelluric data, identify subsurface rock bodies and structures based on the obtained model, and integrate geophysical data with geological data. The methodology employed in this study included the following steps: a) literature review; b) acquisition of magnetotelluric (MT) data; c) filtering and removal of electromagnetic noise; d) calculation of the impedance tensor; e) inversion and obtaining the final model using the ModEM3D code. The study identified three main electrical features: “R1”, “C1”, and “C3”, which were associated with a migmatitic gneiss complex, amphibolites, and amphibolitic gneisses, respectively. Additionally, this study demonstrated the response of rocks to the dextral action of shear zones present in the region.

Keywords: Magnetotelluric, Geotectonics, 3D Modeling and Inversion.

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 TIPOS DE SISTEMAS DE COLETA MT.	19
TABELA 2 RELAÇÃO DE COLETA DE DADOS ENTRE FREQUÊNCIA E TEMPO	22

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 MAPA DE POSICIONAMENTO DAS ESTAÇÕES DE COLETA MT	14
FIGURA 2 MATERIAIS NECESSÁRIOS PARA A COLETA DE DADOS MT	20
FIGURA 3 FLUXOGRAMA DO MÉTODO DE PROCESSAMENTO DE DADOS	21
FIGURA 4 ESPECTRO DE POTÊNCIA COM 16384 JANELAS DE AMOSTRAGEM DA FREQUÊNCIA DE 515 HZ COLETADA PELA ESTAÇÃO 17	23
FIGURA 5 CÓDIGO TSMP SENDO APLICADO PARA REMOVER OS RUÍDOS IDENTIFICADOS NA FIGURA 6	24
FIGURA 6 DADOS DA FREQUÊNCIA DE 512Hz DA ESTAÇÃO 17 APÓS A REMOÇÃO DE RUÍDOS	24
FIGURA 7 CURVA DE RESISTIVIDADE E FASE DA FREQUÊNCIA DE 512Hz COLETADOS PELA ESTAÇÃO 17	25
FIGURA 8 MODELO OBTIDO PELA INVERSÃO	26
FIGURA 9 MODO 2D VIEW DO SOFTWARE 3D GRID	27
FIGURA 10 FERRAMENTA EXTRAC CROSS SECTION DO SOFTWARE 3D GRID	27
FIGURA 11 PERFIL VERTICAL GERADO PELO SOFTWARE 3D GRID	28
FIGURA 12 MODELO 3D GERADO PELO SOFTWARE 3D GRID	28
FIGURA 13 DEMARCAÇÃO DOS DOMÍNIOS DA PROVÍNCIA BORBOREMA E DEMARCAÇÃO DO DOMÍNIO RIO GRANDE DO NORTE EM VERMELHO E ÁREA DE ESTUDO EM VERDE	30
FIGURA 14 MAPA DO NÚCLEO ARQUEANO NO DOMÍNIO RIO GRANDE DO NORTE, PRESENTE EM GRANDE PARTE DA ÁREA DE ESTUDO	31
FIGURA 15 CORTEM EM PLANTA EM DIFERENTES PROFUNDIDADES	32
FIGURA 16 PERFIL VERTICAL COM SENTIDO N-S	33
FIGURA 17 MODELO 3D DOS CORPOS EM SUBSUPERFÍCIE	34
FIGURA 18 MODELOS DOS CORPOS ROCHOSOS INDIVIDUALIZADOS	34
FIGURA 19 MODELO CONTENDO OS CORPOS ROCHOSOS "R1" E O "C1"	35
FIGURA 20 CORPOS "C1" COM A ORIENTAÇÃO DEMONSTRADA	36
FIGURA 21 CORPOS DE ANFIBOLITOS DO MODELO DISPOSTO NO MAPA DA ÁREA	37
FIGURA 22 VISADA NW-SE, MOSTRANDO O ÂNGULO DE MERGULHO E O SENTIDO DOS CORPOS "C3"	38
FIGURA 23 CORPOS ROCHOSOS "C3" DISPOSTOS NO MAPA DA REGIÃO	39
FIGURA 24 MODELO 3D DA SUPERFÍCIE TRANSICIONAL "C2"	40
FIGURA 25 MODELO 3D COM OS CORPOS "C1", "C2", "C3" E "R1"	40
FIGURA 26 MODELO 3D DO CORPO ROCHOSO "R1"	41
FIGURA 27 "R1" POSICIONADO SOBRE O MAPA GEOLÓGICO DO NÚCLEO ARQUEANO	42
FIGURA 28 MODELO CONTENDO OS CORPOS "R1" E "R2"	43
FIGURA 29 ZONAS DE CISALHAMENTO QUE TEM MAIOR INFLUÊNCIA NO NÚCLEO ARQUEANO, DESTACADAS ATRAVÉS DOS CÍRCULOS VERMELHOS	44
FIGURA 30 CORTES EM PLANTA EVIDENCIANDO A AÇÃO DAS ZONAS DE CISALHAMENTO PRESENTES NA REGIÃO	45
FIGURA 31 PERFIL VERTICAL N-S A LESTE DA ÁREA DE ESTUDO	46
FIGURA 32 PERFIL VERTICAL E-W, LOCALIZADO AO SUL DA ÁREA DE ESTUDO	46
FIGURA 33 LOCALIZAÇÃO DOS PERFIS CRIADOS	47
FIGURA 34 MAPA DO NÚCLEO ARQUEANO DO RIO GRANDE DO NORTE, COM A DISPOSIÇÃO DAS ESTAÇÕES DE COLETA	48

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

MT	Magnotelúrico
INCT	Institutos Nacionais de Ciência e Tecnologia
E	Campo elétrico
H	Campo magnético
1D	Variação de resistividade em 1 direção
2D	Variação de resistividade em 2 direções
3D	Variação de resistividade em 3 direções
UNB	Universidade de Brasília
UFC	Universidade Federal do Ceara
UFU	Universidade Federal de Uberlândia
LGPSR	Laboratório de Geofísica
ON	Observatório Nacional
LMT	Longo periodo
BBMT	Banda larga
AMT	Audiofrequência
RMT	Radiofrequência
CSAMT	Fonte controlada
SFMT	<i>Seafloor</i> MT
PbCl	Cloreto de Chumbo
PCs	Computadores
DMC	Domínio médio Coreau
DRGN	Domínio Rio Grande do Norte
R1	Resistor 1
R2	Resistor 2

C1	Condutor 1
----	------------

C2	Condutor 2
----	------------

C3	Condutor 3
----	------------

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	13
2.2 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	14
1.3 OBJETIVO.....	14
2 EMBASAMENTO TEÓRICO	15
2.1 DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO.....	15
2.2 PRINCÍPIO FÍSICO	17
2.3 SISTEMAS MT	18
3 MATERIAIS E MÉTODOS	19
3.1 EQUIPAMENTOS DE COLETA	19
3.2 PROCESSAMENTO DOS DADOS.....	20
3.2.1 AQUISIÇÃO DOS DADOS.....	21
3.2.2 REMOÇÃO DE RUÍDOS.....	22
3.2.3 TENSOR DE IMPEDÂNCIA	24
3.2.4 CONSTRUÇÃO DO MODELO DE INVERSÃO 3D	25
3.3 CONFECÇÃO DOS RESULTADOS	26
4 CONTEXTO GEOLÓGICO	29
5 RESULTADOS	32
5.1 CORTES EM PLANTA	32
5.2 CORTES VERTICAIS.....	32
5.3 MODELOS 3D DOS CORPOS ROCHOSOS.....	33
6 DISCUSSÃO	35
6.1 CORRELAÇÃO DOS RESULTADOS COM A LITERATURA.....	35
6.1.1 CORPO CONDUTIVO C1	35
6.1.2 CORPO CONDUTIVO “C3”	38
6.1.2 CORPO CONDUTIVO “C2”	39
6.1.2 CORPO RESISTIVO “R1”	40
6.2 DEFORMAÇÃO EM PROFUNDIDADE	43
7 CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS	48
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

O Método Magnetotelúrica (MT) é um método geofísico que mede as variações naturais dos campos magnéticos e elétricos, essas variações naturais são decorrentes principalmente da interação entre os ventos solares e a magnetosfera do planeta. Com a obtenção das séries temporais das componentes ortogonais dos campos elétricos e magnéticos, os dados são transformados para o domínio da frequência e então é realizado um cálculo para obter-se o tensor de impedância que é um indicativo de como ocorre a distribuição da resistividade em subsuperfície e desse modo possibilitando uma discriminação entre os materiais que compõem a região. (Tikhonov, 1950; Cagniard, 1953).

O método MT alcança um espectro de frequência de onda muito abrangente, desse modo possibilitando investigações profundas de até 200km, a profundidade é determinada principalmente pela frequência do sinal e resistividade do meio, frequências mais baixas investigam profundidades maiores e frequências menores possibilitam investigações mais rasas. Pesquisas realizadas na região centro-sudeste do Brasil apresentaram resultados preliminares de 23 sondagens MT de baixa frequência e longo período, com períodos de 20 a 13.653 segundos, permitindo investigar estruturas profundas da crosta e do manto superior. Esses estudos indicaram velocidades sísmicas relativamente altas, características de áreas de escudo estável, a profundidades que ultrapassam os 200 km abaixo do cráton do São Francisco (Padilha et al., 2001).

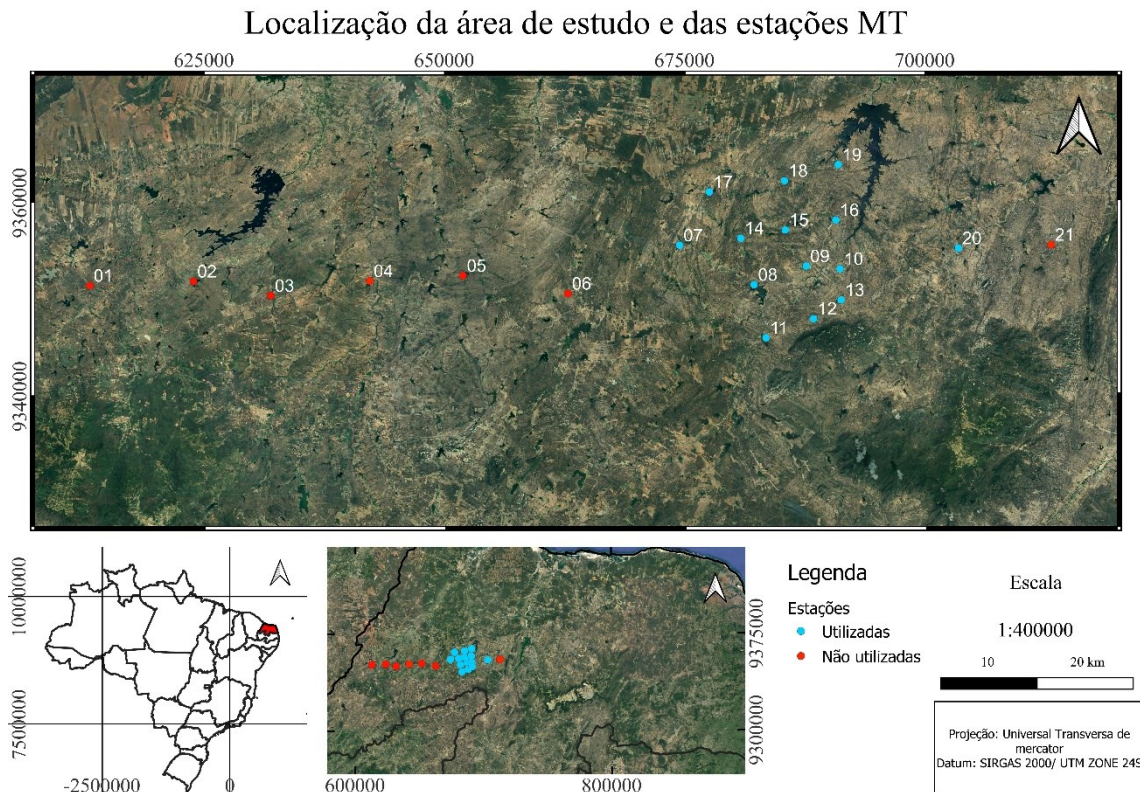
Apresenta também uma alta capacidade para o desenvolvimento acadêmico em relação aos processos geotectônicos que ocorrem na região em que a coleta é realizada, pois o método se mostra eficaz em obter a distribuição das diferentes resistividades em subsuperfície, essa diferença pode ser relacionada com a mudança de mineralogia e presença de fluidos nas rochas presentes em subsuperfície. Também possibilita o desenvolvimento de um modelo de resistividade elétrica 3D utilizando código ModEM que fornece informações espaciais tridimensionais sobre essa distribuição (Egbert & Kelbert, 2012).

Diversos trabalhos que utilizam o método MT estão em desenvolvimento ao redor do Brasil, com um foco na região norte e nordeste, devido à facilidade para aquisição dos dados através do INCT/Estudos Tectônicos. Como por exemplo os trabalhos realizados por UCHOA, et. al (2020) contemplando o Cráton São Luís, faixa gurupi e a bacia do Parnaíba.

1.2 Localização da área de estudo

Á área de estudo está localizada na região nordeste do Brasil, no estado do Rio grande no Norte, próximo ao município de Campo Grande-RN.

Figura 1 Mapa de posicionamento das estações de coleta MT



Fonte: O autor

Os dados utilizados neste trabalho foram adquiridos pelo laboratório de geofísica da Universidade Federal do Ceará e disponibilizados pelo INCT/Estudos Tectônicos, contempla um conjunto de 21 estações disposta no nordeste do Brasil como representado na figura 1.

Os Dados de 14 estações foram utilizados neste trabalho e passaram por diversas etapas de processamento para tornar possível o desenvolvimento de um modelo de resistividade elétrica 3D.

1.3 Objetivo

Desenvolver um modelo de resistividade 3D da área de estudo através dos dados coletados em campo pelas estações MT.

Analisar os resultados do modelo de resistividade em conjunto com as informações geológicas da área.

Contribuir para o conhecimento tectônico da Província Borborema.

2 EMBASAMENTO TEÓRICO

2.1 Desenvolvimento do método

Tikhonov (1950) e Cagniard (1953) são os responsáveis por propor o Método Magnetotelúrico (MT).

Chave & Jones (2012) destacam que o desenvolvimento e refinamento do método é resultado de inúmeras pesquisas realizadas no final do século XIX e na primeira metade do século XX.

Schuster (1889) utilizou a técnica de separação de Gauss para calcular a variação diurna do campo magnético, o que se tornou um marco importante no início das discussões sobre a indução eletromagnética da Terra.

A separação de Gauss consiste em um método para facilitar a resolução de sistemas de equações lineares, transformando-os em uma matriz com todos os coeficientes os presentes nas equações. Reduzindo a matriz para uma forma escalonada através do uso de equações de linha, para que desse modo seja possível utilizar a substituição reversa para resolver a equações mais facilmente.

No campo do geomagnetismo esse método é utilizado para dividir o campo magnético da terra em componentes internas e externas para observar as variações diurnas. O campo magnético sofre variações ao longo do dia, muitas vezes devido à atividade solar, essas variações são medidas por observatórios ao redor do mundo, no Brasil o observatório Tatuoca localizado na região amazônica no Pará e o centenário de Vassouras no interior do Rio de Janeiro.

Utilizando harmônicos esféricos na separação de guass para descrever o campo magnético da terra é possível determinar quais contribuição são internas, núcleo da terra e externas, geralmente devido as atividades solares. Após a separação é realizada a modelagem das variações diurnas para isolar fontes externas de ruído das internas(Frigo, 2023).

Após a separação é realizada a modelagem das variações diurnas para isolar fontes externas de ruído das internas.

Chapman & Price (1930) propuseram modelos de resistividade elétrica da Terra e suas variações com a profundidade. Desse modo sendo possível correlacionar as mudanças de

resistividades em diferentes profundidades com as variações na composição do material, presença de água nos poros das rochas assim como variações de temperatura e pressão dos ambientes.

Hirayama (1934) abordou o comportamento ortogonal entre as componentes dos campos elétrico (E) e magnético (B), essa orientação ortogonal é um dos princípios chaves do método magnetotelúrico.

Rikitake (1951), destacou a medição da amplitude do campo eletromagnético (E/B), considerando as mudanças de fase e período (domínio do tempo), por meio da variação da resistividade em função da profundidade(1D).

Neves (1957) avançou ao identificar o tensor resultante da relação entre os campos elétrico e magnético. Esse tensor é uma matriz que relaciona as componentes dos campos E e B em diferentes direções(2D). Diferente do que era utilizado anteriormente, onde as componentes de E e B eram dispostas de maneira paralela tornando-as simples de correlacionar

Neves (1957) propôs um cenário onde as direções dos campos podem variar lateralmente devido a presença de estruturas geológicas, desse modo requerendo uma abordagem mais complexa, que foi abordada no algoritmo desenvolvido por ele para resolver a questão do levantamento magnetotelúrico em 2D.

O uso do método MT tem se expandido significativamente, como evidenciado no trabalho de Stanley et al. (1977), que realizaram 16 sondagens MT na região de Yellowstone, EUA, para fins de investigação geológica.

As pesquisas sobre a inversão 3D tiveram início em 1980, mas seu desenvolvimento foi desacelerado devido à baixa capacidade computacional disponível na época Silva, J. B. C (2002).

O uso do método dos elementos finitos e do método das diferenças finitas para resolver as equações de Maxwell no contexto 3D foram explorados nessa época, permitindo a simulação do comportamento eletromagnético em ambientes tridimensionais.

Mackie et. al (1994) desenvolveram um algoritmo de inversão baseado em diferenças finitas, especificamente adaptado para o modelo 3D. Utilizando o método de gradientes conjugados não lineares foi possível ajustar um modelo de resistividade 3D.

Rodi & Mackie (2001) desenvolveram um algoritmo de gradientes conjugados não lineares que permite a utilização de grandes conjuntos de dados e desse modo é possível estudar áreas mais amplas e com maior resolução.

Egbert & Kelbert (2012) desenvolveram um código de inversão 3D ModEM (*Modular EM inversion*) que possui a capacidade de grande aporte de dados permitindo altas resoluções além de realizar restrições para que os modelos sejam geologicamente plausíveis e estáveis.

O código é baseado em gradientes conjugados não lineares, que foram otimizados para aumentar a eficiência computacional do processamento, permitindo que o método magnetotelúrico se torne mais acessível.

No Brasil, diversos centros acadêmicos têm se destacado no uso da técnica MT, entre eles: a Universidade de Brasília (UNB), a Universidade Federal do Ceará (UFC), através do laboratório de Geofísica (LGPSR), O observatório Nacional (ON) e agora, a Universidade Federal de Uberlândia (UFU) em parceria com as duas primeiras citadas anteriormente.

Esses institutos têm conduzido diversos levantamentos MT, especialmente nas últimas duas décadas (Pedrosa Jr, 2015; Esposito, 2016; Oliveira, 2016; Silva, 2016; Silva, 2018), todos estes financiados pelo INCT/Geotectônica.

2.2 Princípio físico

Os fundamentos físicos do método MT baseiam-se nas equações de Maxwell, complementadas pelas equações constitutivas.

As equações de Maxwell descrevem o comportamento dos campos elétrico e magnético no meio em que se propagam, enquanto as equações constitutivas relacionam o comportamento do campo eletromagnético com as propriedades físicas do meio. As equações de Maxwell estão demonstradas abaixo.

$$\nabla \cdot D = \rho_e \quad (1)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (2)$$

$$\nabla \times E = -\partial_t B \quad (3)$$

$$\nabla \times H = J + \partial_t D \quad (4)$$

Sendo:

(1) : (Lei de Gauss para eletricidade)

(2) : (Lei de Gauss para o magnetismo)

(3) : (Lei de Faraday)

(4) : (Lei de Ampère)

B : Indução magnética

D : Deslocamento elétrico

E : Campo elétrico

H : campo magnético

J : Densidade de corrente

ρ_e : Densidade de carga

Abaixo estão representadas as equações auxiliares:

$$D = \varepsilon E$$

$$B = \mu H$$

$$J = \sigma E$$

Sendo:

ε : Permissividade dielétrica

μ : Permeabilidade magnética

σ : Condutividade do meio

2.3 Sistemas MT

Há diversos sistemas para coleta de dados MT, que são organizados de acordo com a fonte do sinal (natural ou controlada) e o local de medição, seja em terra ou no oceano (Vozoff, 1991; Simpson & Bahr, 2005). Cada sistema opera em um intervalo de aquisição específico baseado no período, como apresentado na tabela 1.

Tabela 1 Tipos de sistemas de coleta MT.

Sistema MT	Fonte do sinal	Período de Aquisição
LMT	Natural	De 1s a $> 10^4$
BBMT	Natural	De 10^{-3} s a 10^3 s
AMT	Natural	De 10^{-4} s a 10^{-1} s
RMT	Natural	De 10^{-6} s a 10^{-4} s
SFMT	Natural	BBMT e LMT
CSAMT	Artificial	De 10^{-4} s a 8s

Fonte: O autor.

Para medições MT realizadas em terra com uso de sinais naturais, existem os sistemas de longo período (LMT), banda larga (BBMT), áudio-frequência (AMT) e radiofrequência (RMT). Quando o sinal é gerado artificialmente, os sistemas são de fonte controlada (CSAMT). Já as medições feitas no fundo do mar são chamadas de seafloor MT (SFMT).

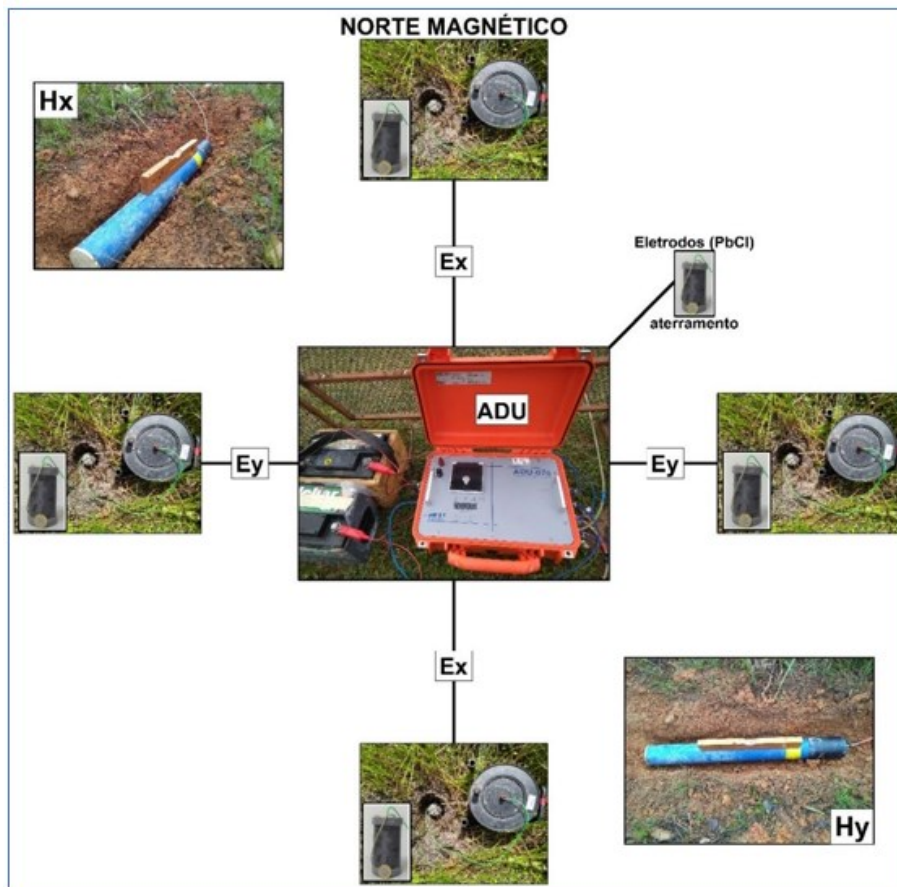
O equipamento utilizado neste trabalho opera com um intervalo de aquisição de 10^{-3} s a 10^3 s, utilizando um sistema de banda larga (BBMT).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Equipamentos de coleta

Os equipamentos que foram utilizados durante as aquisições dos dados MT em campo consistem em: uma central ADU-07e da Metronix, duas bobinas de indução para medição das variações da intensidade do campo magnético (H_x e H_y). Quatro eletrodos não polarizados à base de PbCl para medição das componentes do campo elétrico (E_x e E_y). Um eletrodo não polarizado para o aterramento e duas baterias automotivas de 60 Ah para alimentar a central ADU-07e. A Figura 3 mostra os equipamentos de uma estação instalada segundo o arranjo proposto por Simpson & Bahr (2005).

Figura 2 Materiais necessários para a coleta de dados MT



Fonte: Simpson & Bahr (2005).

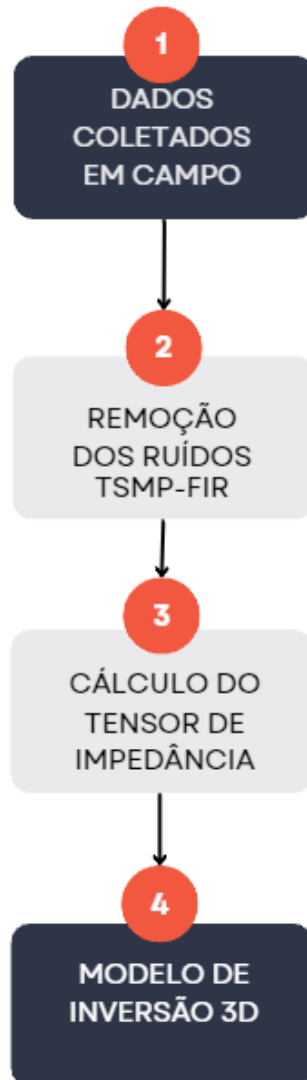
Após a coleta realizada em campos os dados são armazenados para que posteriormente sejam processados a fim de remover ruídos e gerar produtos de maior qualidade.

3.2 Processamento dos dados

O processamento dos dados é apresentado no fluxograma da Figura 4. Os dados de cada estação são processados individualmente e, posteriormente utilizados em conjunto para o cálculo de inversão.

Figura 3 Fluxograma do método de processamento de dados

PROCESSAMENTO DE DADOS



Fonte: O autor

3.2.1 Aquisição dos dados

O processo de instalação das estações MT em campo deve atender os seguintes critérios: Deve ser escolhida uma região com vegetação de baixo porte e área com raio mínimo de 50 m; os eletrodos de PbCl devem ser orientados a partir do norte magnético, colocados em contato com solo úmido e bentonita (em furos de 20 cm de profundidade) e interligados com a central através de cabos elétricos (Uchoa, 2021).

As duas bobinas de indução utilizadas devem ser niveladas e orientadas (com bússola) N-S (magnéticos) (Hx) e E-W (magnéticos) (Hy) e ligadas na central através de cabos; em

seguida as baterias são utilizadas para alimentar a central e realizados os testes de contatos dos eletrodos (com multímetro analógico). Uma vez instalados todos os aparatos necessários, são inseridas na central ADU as frequências que serão adquiridas com os tempos de aquisição.

A figura 5 mostra o tempo de aquisição de cada frequência das estações medidas em campo, destaca-se que neste trabalho, somente foram utilizadas as frequências de 4 KHz até 128 Hz, sendo esta última dizimada até 8s.

Tabela 2 Relação de coleta de dados entre frequência e tempo

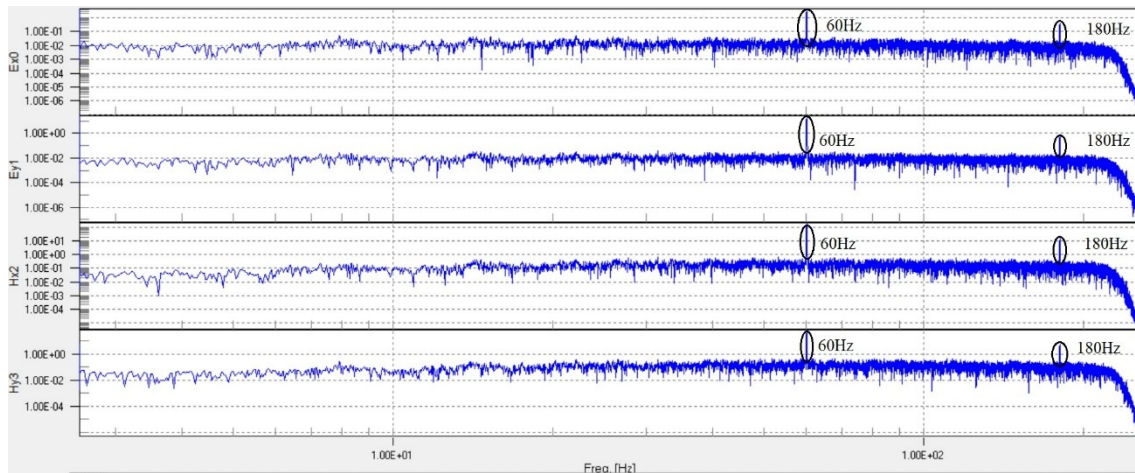
Frêquencia	Tempo
131072 Hz	3 minutos
65536 Hz	5 minutos
16384 Hz	10 minutos
4096 Hz	30 minutos
512 Hz	50 minutos
128 Hz	23 horas
32 Hz	Dizimado
4 Hz	Dizimado
0.125 Hz	Dizimado

Fonte: O autor

3.2.2 Remoção de ruídos

Para o processamento dos dados, foi realizada a remoção de ruídos que foram gerados devido à interferência da rede elétrica brasileira que está localizada próximos aos locais de aquisição. Esses ruídos impactam diretamente a qualidade das informações, como observado na figura 6.

Figura 4 Espectro de potência com 16384 janelas de amostragem da frequência de 515 Hz coletada pela estação 17



Fonte: O autor

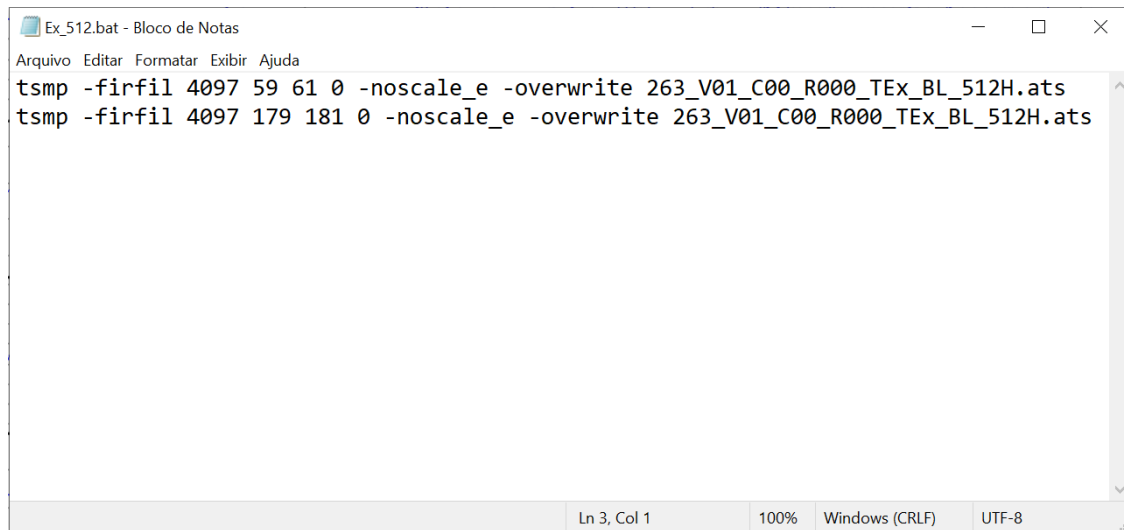
Os ruídos foram removidos utilizando o código TSMP (*Time Series Manipulation Process*), esse código permite ao usuário realizar correções permanentes nos dados de aquisição das estações.

Desse modo o arquivo ruidoso original é destruído, pois o arquivo corrigido é gravado sobre ele, por isso é necessário realizar cópias dos arquivos originais para refazer os processamentos caso os resultados não sejam satisfatórios.

O TSMP emprega o Filtro *Fir* e é modelado manualmente para todos os canais Ex, Ey, Hx, Hy de todas as estações e suas respectivas frequências de aquisição, com o objetivo de eliminar meticulosamente os sinais ruidosos selecionados da série temporal (Borah et al., 2015).

A figura 5 demonstra como é realizada a aplicação do filtro Fir, delimitando o corte inicial e final que será feito no espectro de potência para eliminar o ruído, no caso da figura 5 o corte é realizado em 59 e 61; 179 e 181. Dessa forma, foram removidos os ruídos na frequência de 60 Hz, que é a frequência da rede elétrica brasileira, e seus harmônicos pares e ímpares sendo representado pelos círculos pretos na figura 6, identificados na série temporal através do *software* Mapros.

Figura 5 Código TSMP sendo aplicado para remover os ruídos identificados na figura 6



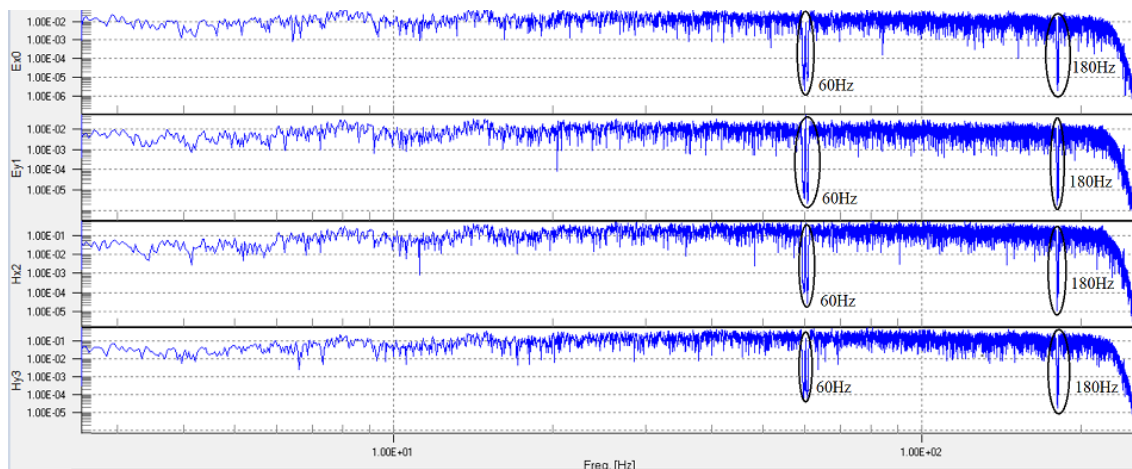
```

Arquivo  Editar  Formatar  Exibir  Ajuda
tsmp -firfil 4097 59 61 0 -noscale_e -overwrite 263_V01_C00_R000_TEx_BL_512H.ats
tsmp -firfil 4097 179 181 0 -noscale_e -overwrite 263_V01_C00_R000_TEx_BL_512H.ats
  
```

Ln 3, Col 1 100% Windows (CRLF) UTF-8

Fonte: O autor

Figura 6 Dados da frequência de 512Hz da estação 17 após a remoção de ruídos



Fonte: O autor

3.2.3 Tensor de impedância

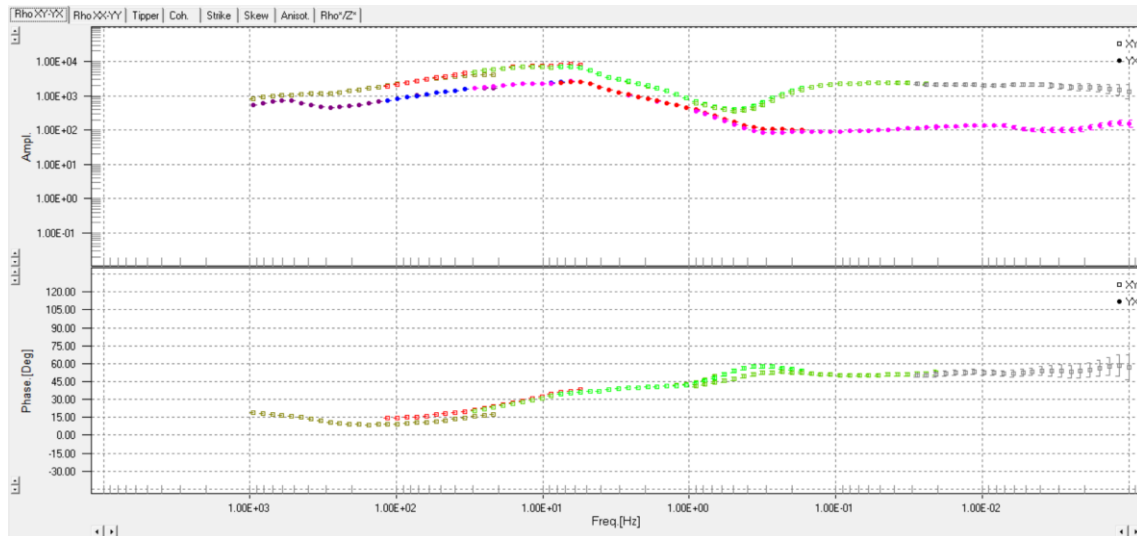
Após a remoção dos ruídos, inicia-se a segunda etapa do processamento que consiste na transformação dos arquivos das séries temporais (domínio do tempo) em tensores de impedância (domínio da frequência), resultando em dados de resistividade aparente e fase.

O tensor Impedância é constituído através da relação ortogonal dos campos elétrico e magnético, em uma localização específica e com uma frequência definida.

Esse processo foi realizado com o software Mapros, utilizando vários parâmetros, como *selected stack*, *coherency threshold*, *stack all*, *window length FFT* e *parzen radius*.

Foram selecionados entre os parâmetros citados anteriormente aqueles que proporcionam maior suavidade e coerência para as curvas de resistividade (ρ), fase (Φ), tensor de impedância (Z), como demonstrado na figura 7.

Figura 7 Curva de resistividade e fase da frequência de 512Hz coletados pela estação 17



Fonte: O autor

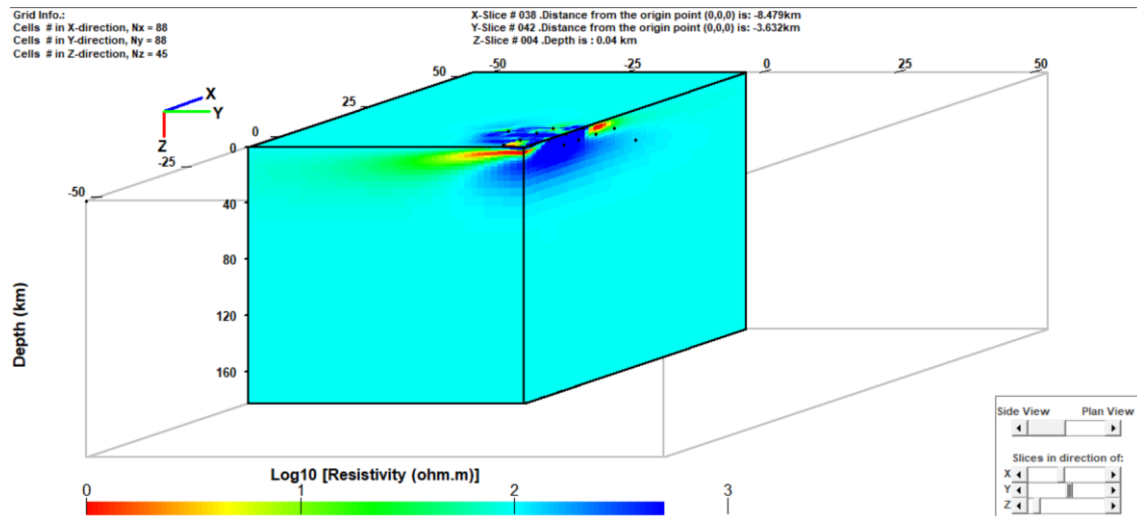
3.2.4 Construção do modelo de inversão 3D

Ao total foram processadas 14 estações em forma de bloco-diagrama 3D, cujos períodos foram de 10^{-3} até 10^3 s, sendo 5km de espaçamento entre as estações nas 3 linhas N-S contendo, quatro estações em cada, duas estações nas extremidades Leste e Oeste (MT07 e MT20) abrangendo uma área de um pouco mais que 300m², como demonstrado na figura 1.

Pelo fato da inversão ser tipicamente 3D, não foi necessário realizar o cálculo de análise de dimensionalidade dos dados obtidos, em função do código considerar todas as componentes Z_{xy} , Z_{yx} , Z_{xx} , Z_{yy} , T_x e T_y durante a modelagem. Tal cálculo apenas seria útil se o modelo de inversão fosse do tipo 2D.

O modelo inicial de inversão foi criado no *software* gratuito 3D GRID através de um cubo com 88 células na componente horizontal X, 88 células na componente horizontal Y e 45 células na componente Z (88x88x45), resistividade homogênea de 500 ohm.m, sendo cada célula com valor igual de 1.2 km na direção em X e 1.2 km na direção em Y, com profundidade inicial de 10 m e um incurring de 1.2. Na figura 8 é possível observar o modelo final do modelo.

Figura 8 Modelo obtido pela inversão



Fonte: O autor

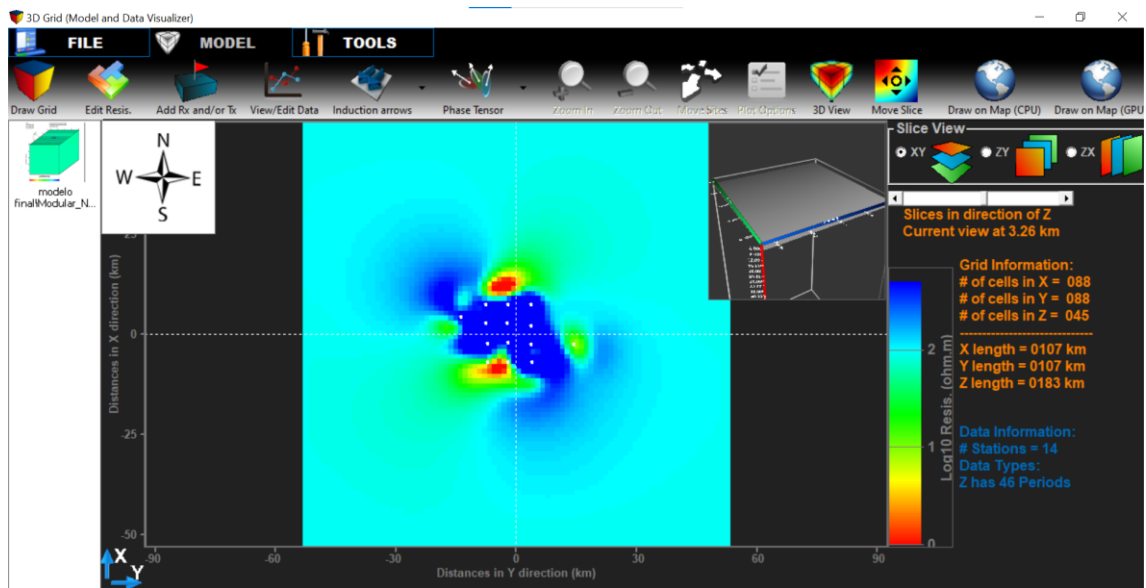
O código ModEM3D (Egbert & Kelbert 2012), todas as componentes de impedâncias, cujos parâmetros de inversão foram de 5% de configuração de erro e de erro Flor. O modelo final foi concluído em 4 dias e obteve cerca de 118 interações com rms de 7%.

É necessária uma alta potência computacional para realizar o processo de inversão. Desse modo tornou-se inviável sua execução em máquinas comuns. Por isso, os dados foram processados em um cluster de PCs da Universidade de Lisboa (ULisboa), acessado via o *software* Bitvise, por meio de acesso disponibilizado pelo INCT/Estudos Tectônicos.

3.3 Confeção dos resultados

A partir do modelo obtido pela inversão utilizando o *software* 3DMT através da função 2D view é possível realizar visadas em planta em diferentes profundidades em subsuperfície, demonstrado na figura 9.

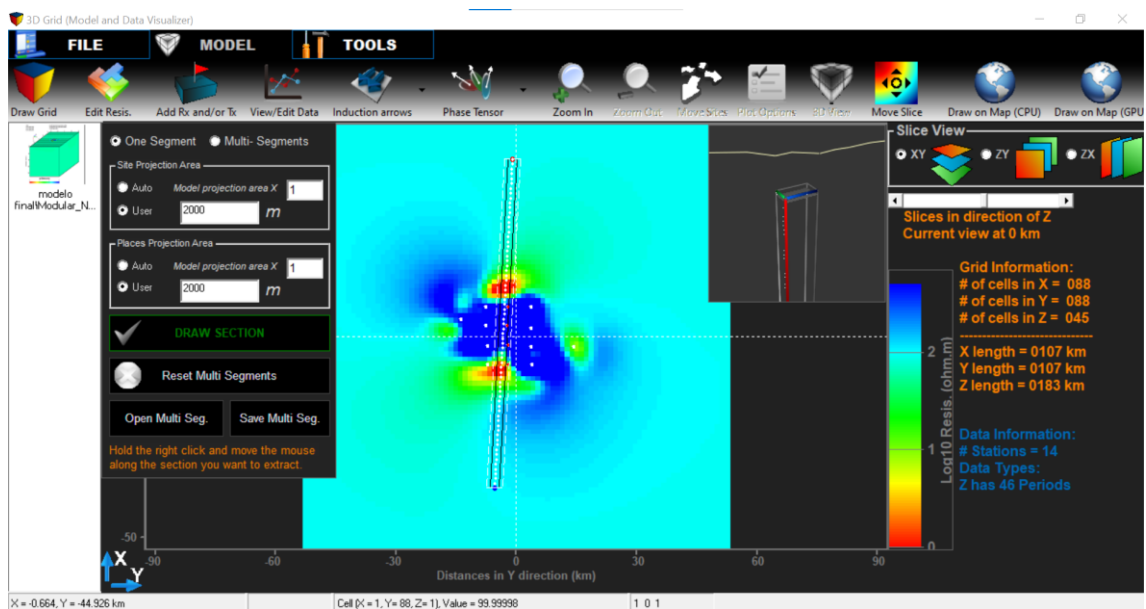
Figura 9 Modo 2D view do software 3D Grid



Fonte: O autor

Ao utilizarmos a ferramenta “*Extrac cross section*” é possível definir linhas em qualquer região e sentido dentro área de estudo. Assim permitindo observar feições específicas da área, como exemplificado pela figura 10.

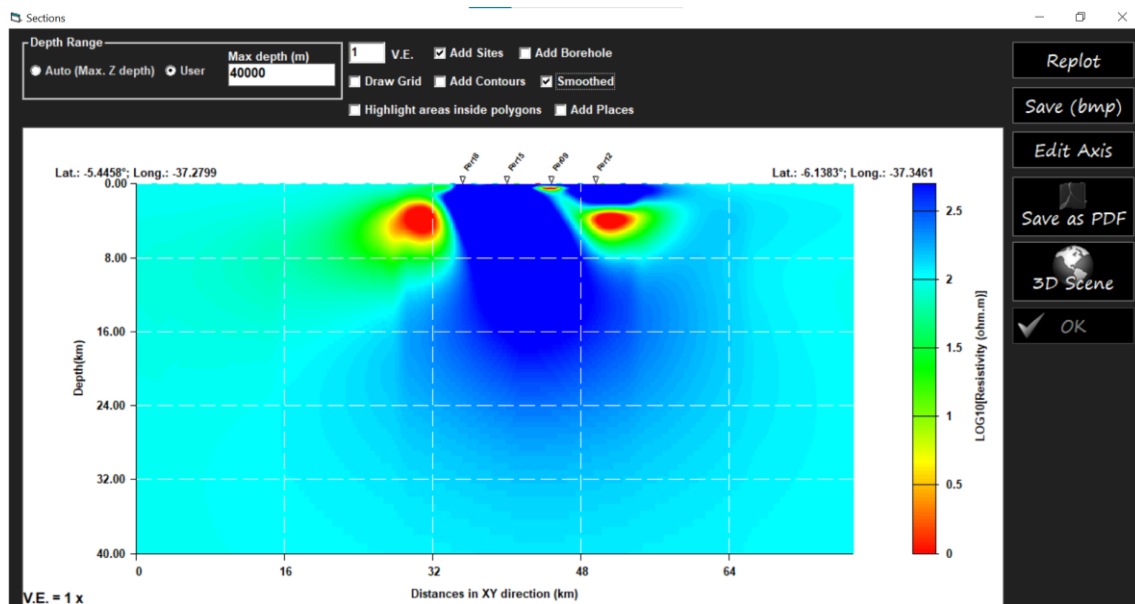
Figura 10 Ferramenta Extrac cross section do software 3D Grid



Fonte: O autor

O *software* realiza a construção de perfis verticais como mostrado na figura 11.

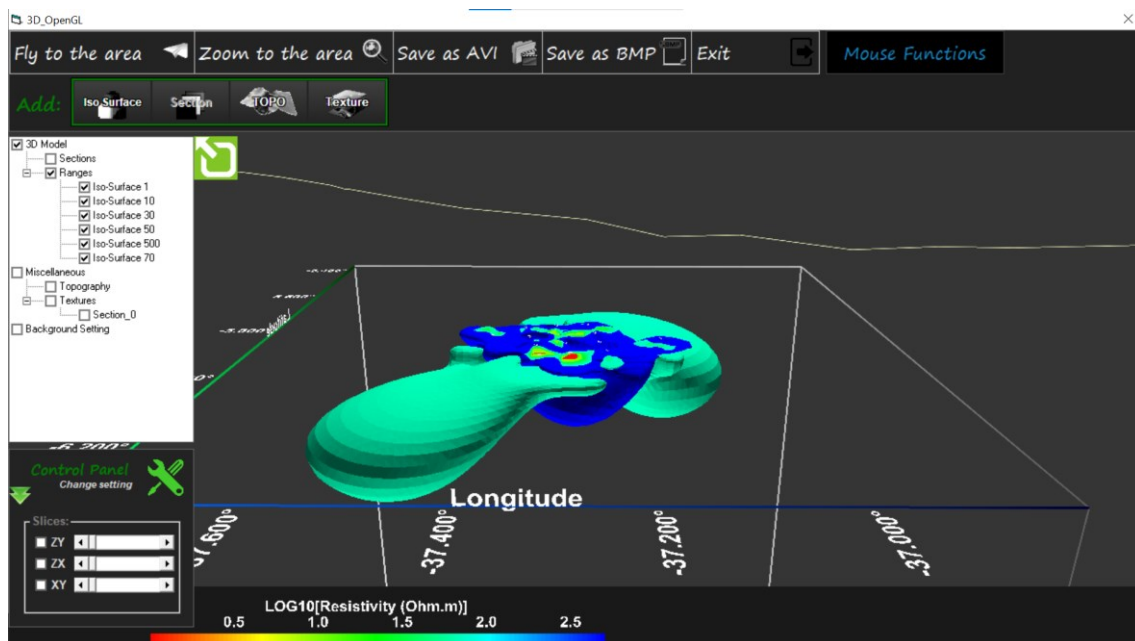
Figura 11 Perfil vertical gerado pelo software 3D Grid



Fonte: O autor

Com a ferramenta *3D Scene*, utilizando a opção de *ISO surface* é possível produzir modelos 3D baseados na variação espacial da resistividade do meio, desse modo discriminado os corpos rochosos presentes em subsuperfície, como demonstrado na figura 12.

Figura 12 Modelo 3D gerado pelo software 3D Grid



Fonte: O autor

4 CONTEXTO GEOLÓGICO

A província Borborema é composta por fragmentos de crosta arqueana, além de abrigar complexos de migmatitos e gnaisses Paleoproterozoicos, assim como rochas supracrustais de idade meso e neoproterozóica (Jardim de Sá, 1994; Brito Neves et al., 2000; Van Schmus et al., 2008). Durante o Ciclo Brasileiro ocorreu a colisão dos crátons África Ocidental-São Luís e São Francisco-Congo (Van Schmus et al., 2008) e consequentemente houve o desenvolvimento de uma rede de zonas de cisalhamento transcorrentes de escala continental, devido aos planos de fraqueza já existentes e a presença dos fragmentos crustais (Brito Neves et al., 2000; Arthaud et al., 2008; Gray et al., 2008; Santos et al., 2008; Ganade et al., 2014; Padilha et al., 2017).

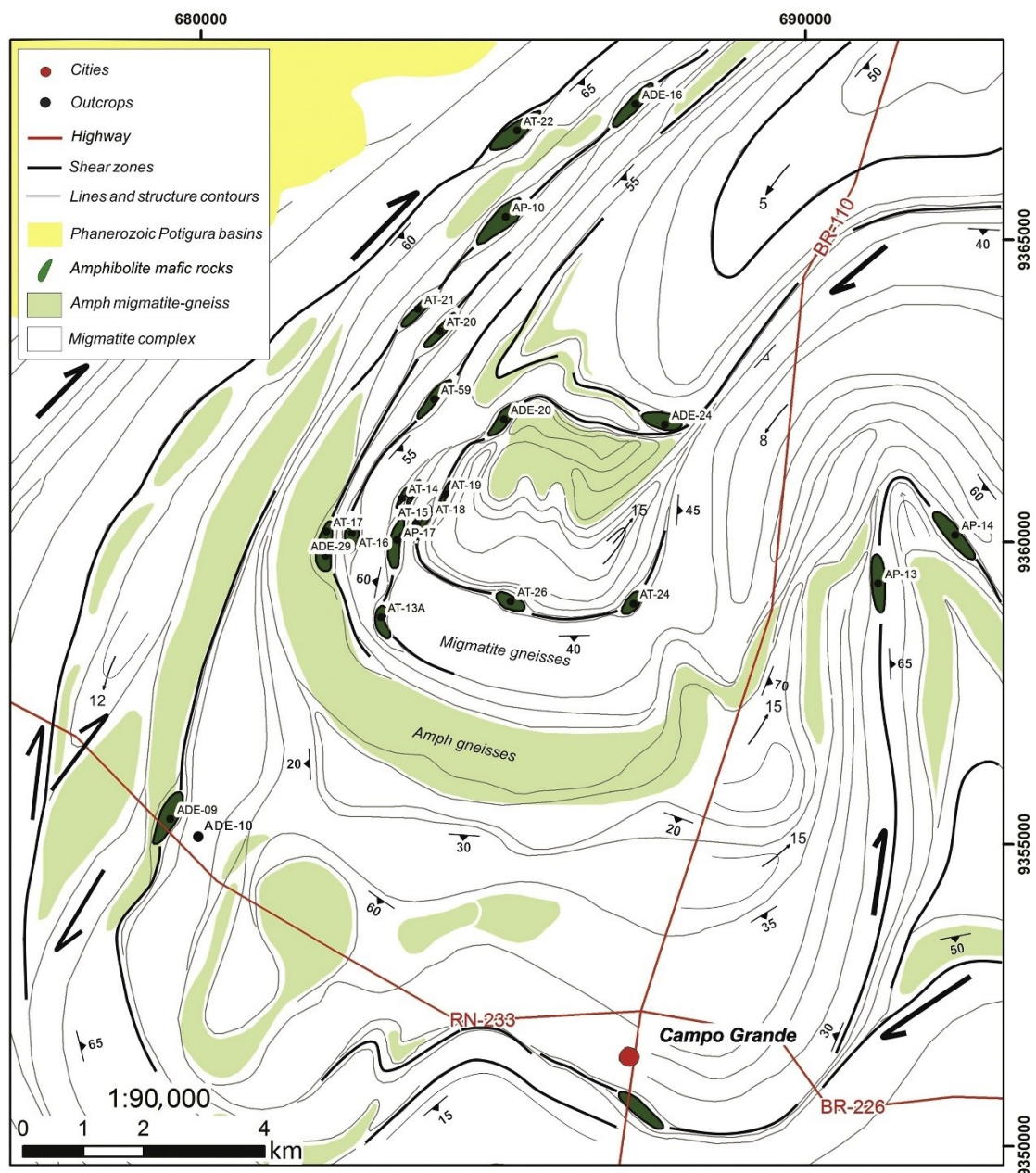
Essas zonas de cisalhamento abrangem mais 200.000 km² e afetam diretamente os ajustes locais dos terrenos da província, dividindo os terrenos em alto grau migmatítico e gnáissico Paleoproterozoico, que passaram por metamorfismo com uma alta temperatura constante com variações de pressão de média para baixa.

Essas zonas de cisalhamento foram utilizadas para delimitar domínios que possuem características distintas. Sendo os principais Domínio médio Coreau (DMC); Domínio Cearense; Domínio Rio Grande do Norte; Domínio da zona Transversal e Domínio externo, como representado pela figura 13.

supracrustais neoproterozoicas, como o Grupo Seridó (Van Schmus et al., 2008; Ferreira et al., 2019).

O núcleo Arqueano representado na figura 14 foi mapeado como parte do embasamento do Domínio Rio Grande do Norte, composto por um complexo Gnaiss migmatítico com lentes supracrustais e granitos intrusivos do neoproterozóico (Galindo, 1993; Trindade et al., 1999). Contudo, foram demarcadas algumas lentes de anfibolitos fragmentas conforme relatado por Ferreira et al. (2020) representadas na figura 14.

Figura 14 Mapa do núcleo arqueano no Domínio Rio Grande do Norte, presente em grande parte da área de estudo



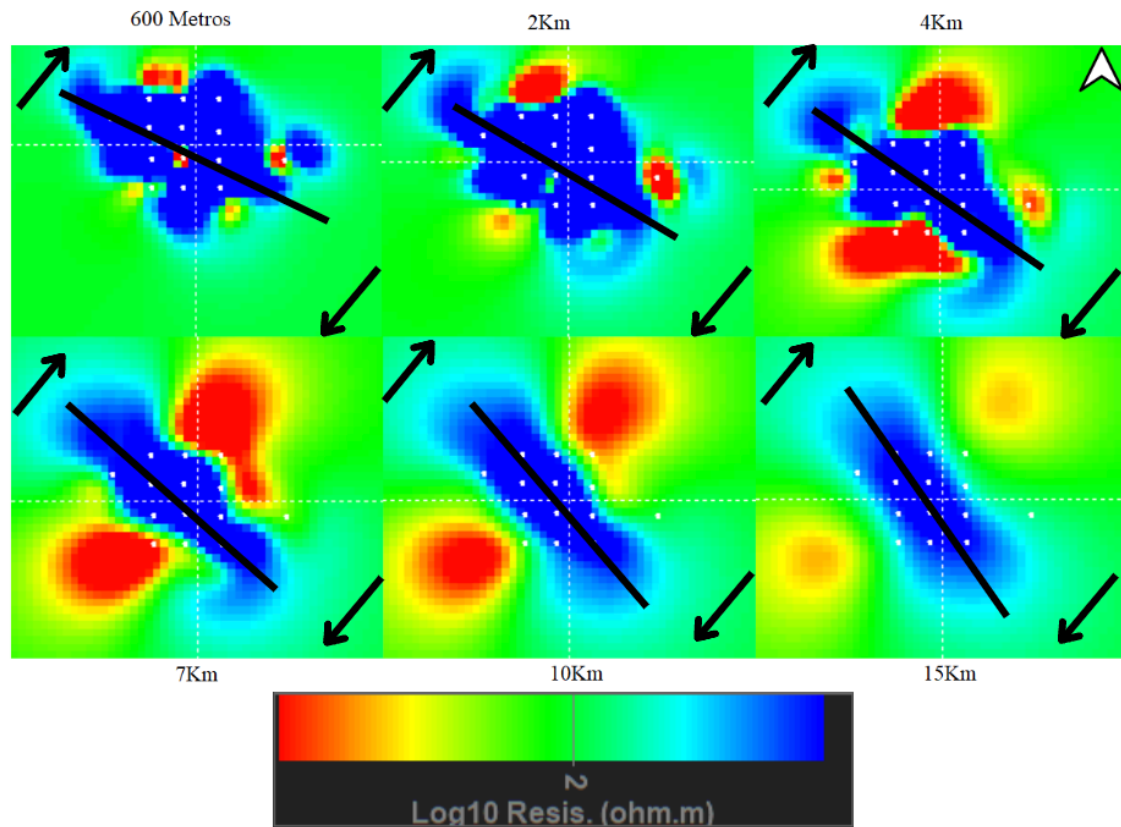
Fonte: Ferreira et al. (2020)

5 RESULTADOS

5.1 Cortes em planta

Um dos principais produtos obtidos no trabalho consiste em cortes horizontais realizados em diferentes profundidades do modelo de resistividade, resultando em perfis em planta como observado na figura 15.

Figura 15 Cortes em planta em diferentes profundidades



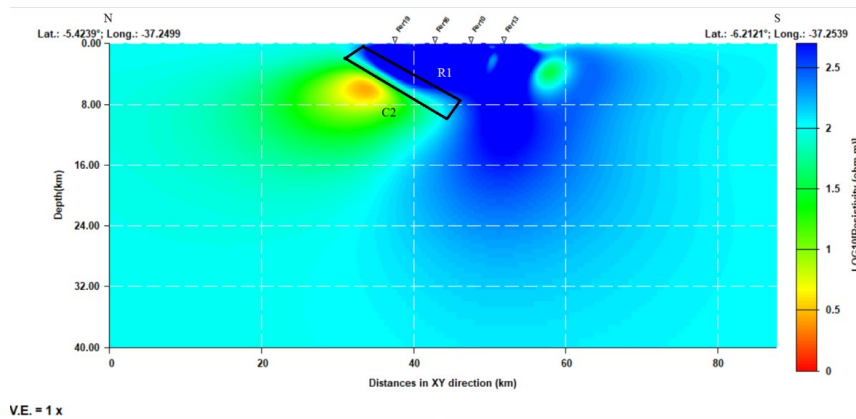
Fonte: O autor

Estes cortes possibilitam uma análise sobre distribuição da resistividade no meio em diferentes profundidades, desse modo facilitando a análise de processos geológicos que possam ter ocorrido naquela área, como por exemplo a deformação causada pelas zonas de cisalhamento que estão presentes na região.

5.2 Cortes verticais

O mesmo processo de corte pode ser realizado para produzir perfis verticais como os observado na figura 16.

Figura 16 Perfil vertical com sentido N-S



Fonte: O autor

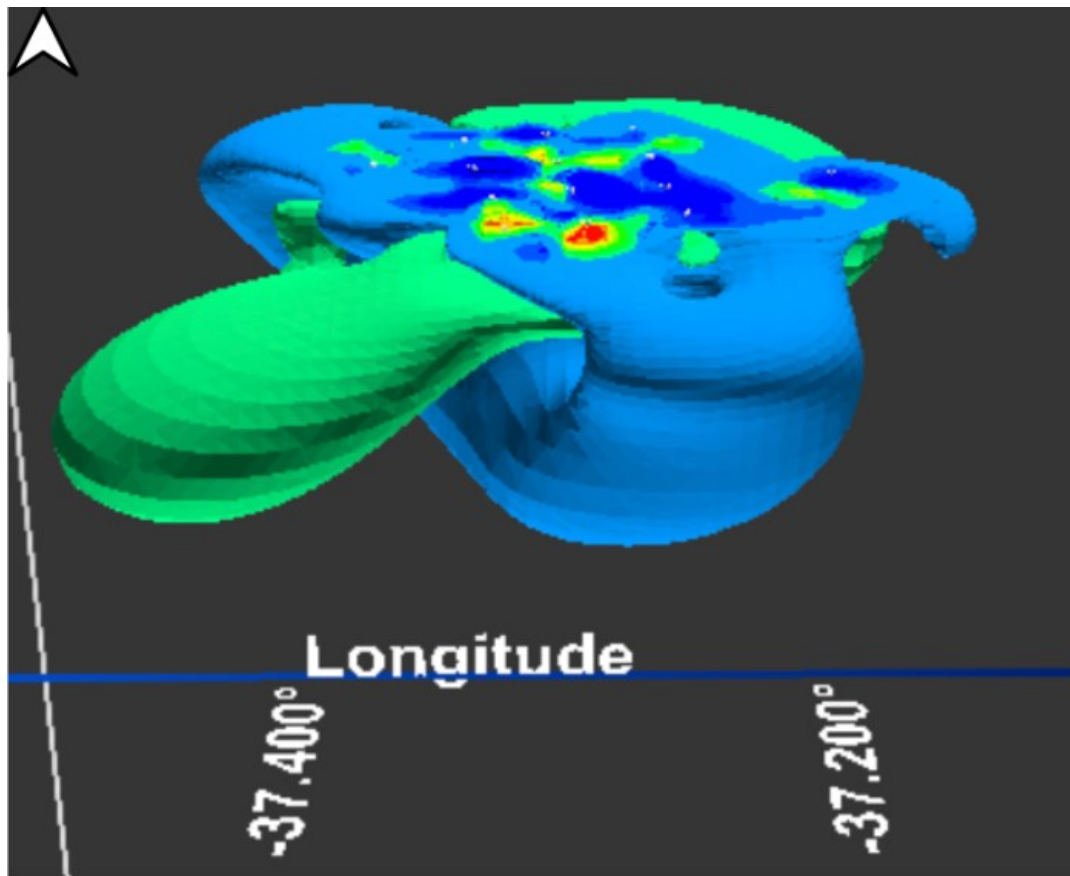
Esses perfis apresentam um potencial maior para a identificação de estruturas verticais como falhas, e facilitam a interpretação da interface de contato entre os corpos rochosos presentes na região.

Como podem ser realizados rapidamente a partir de qualquer local e com sentidos variados, é uma importante ferramenta para a interpretação geológica, pois possibilita verificar como feições identificadas em superfície se comportam em profundidade.

5.3 Modelos 3D dos condutores e resistores

O modelo 3D facilita a observação espacial dos corpos rochosos e evidencia a relação de contato e transição entre eles, como está representado na figura 17.

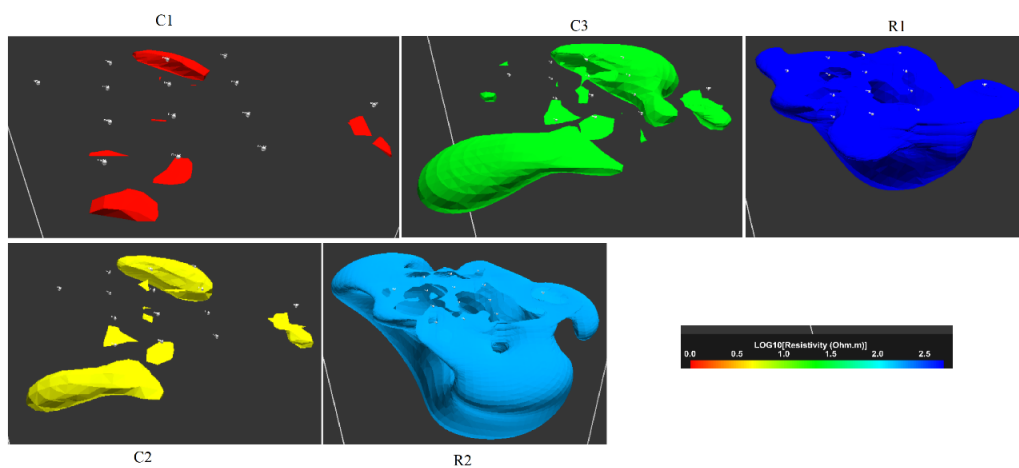
Figura 17 Modelo 3D dos corpos em subsuperfície



Fonte: O autor

É possível determinar um valor específico de variação da resistividade com o intuito de isolar os materiais condutores e resistores para uma análise individual mais detalhada, como representado na figura 18.

Figura 18 Modelos dos corpos rochosos individualizados



Fonte: O autor

A figura apresenta cinco variações que foram identificadas através da aglomeração de pontos de resistividade semelhante, sendo o mais resistivo o “R1” e o mais condutivo o “C1”, O “R2” e o “C2” representam zonas de transição entre corpos rochosos, já o “C3” é um corpo com resistividade intermediária.

6 DISCUSSÃO

6.1 Correlação dos resultados com a literatura

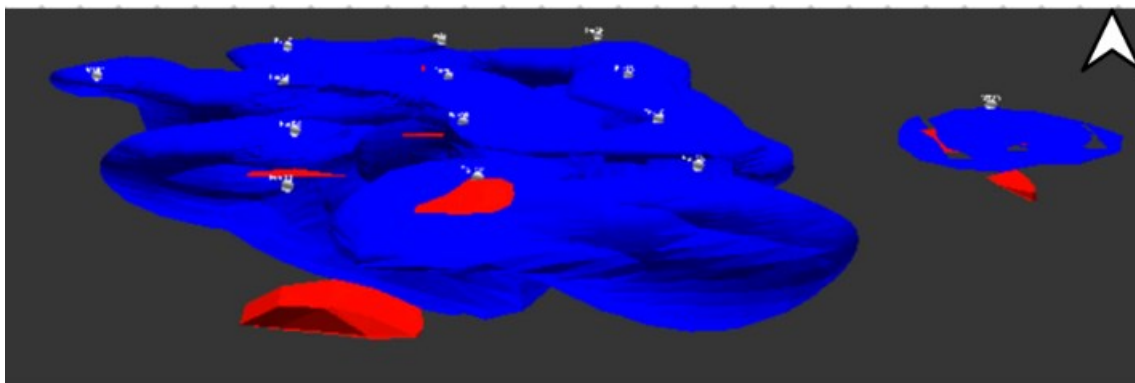
Os resultados adquiridos nos modelos são baseados na diferença espacial de resistividade em subsuperfície, por esse motivo não temos as informações necessárias para discriminar com propriedade as litologias presentes na área com os dados magnetelúricos.

Por isso foi utilizado informações disponíveis sobre a área de estudo para realizar uma correlação entre as informações, para aumentar o embasamento dos resultados.

6.1.1 Condutor C1

Os corpos rochosos com maior condutividade denominados de “C1” apresentam uma resistividade de 0.1 ohm.m, possuem uma forma lenticular e estão dispostos como corpos desconexos espalhados pela área de estudo, se hospedam dentro e ao redor do núcleo mais resistivo denominado de “R1”, como observado na figura 19.

Figura 19 Modelo contendo os corpos rochosos "R1" e o "C1"



Fonte: O autor

Esse mesmo comportamento lenticular foi descrito por Ferreira et al. (2020) para caracterizar os corpos de anfibolito, que apresentam uma orientação preferencial de N-NE e E-W, que correspondendo às orientações identificadas no “C1”, como mostrado na figura 20.

Figura 20 Corpos "C1" com a orientação demonstrada



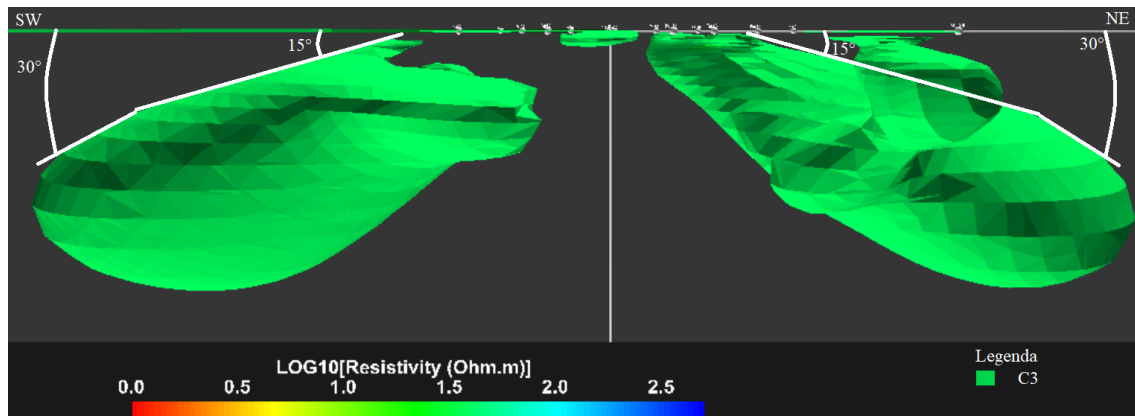
Fonte: O autor

É possível, associar a posição de algumas das lentes de anfibolito mapeadas em campo com os condutores C1 encontrados no modelo, através da relação da orientação e proximidade dos corpos com as estações de coleta MT, como representado pela figura 21.

6.1.2 Condutor “C3”

Os corpos condutivos “C3” com uma variação de 1 à 1.5 ohm.m, estão representados na figura 22 e apresentam um espalhamento com sentido NE-SW com ângulo de mergulho do corpo aumentando conforme ocorre o distanciamento do corpo “R1”.

Figura 22 Visada NW-SE, mostrando o ângulo de mergulho e o sentido dos corpos "C3"

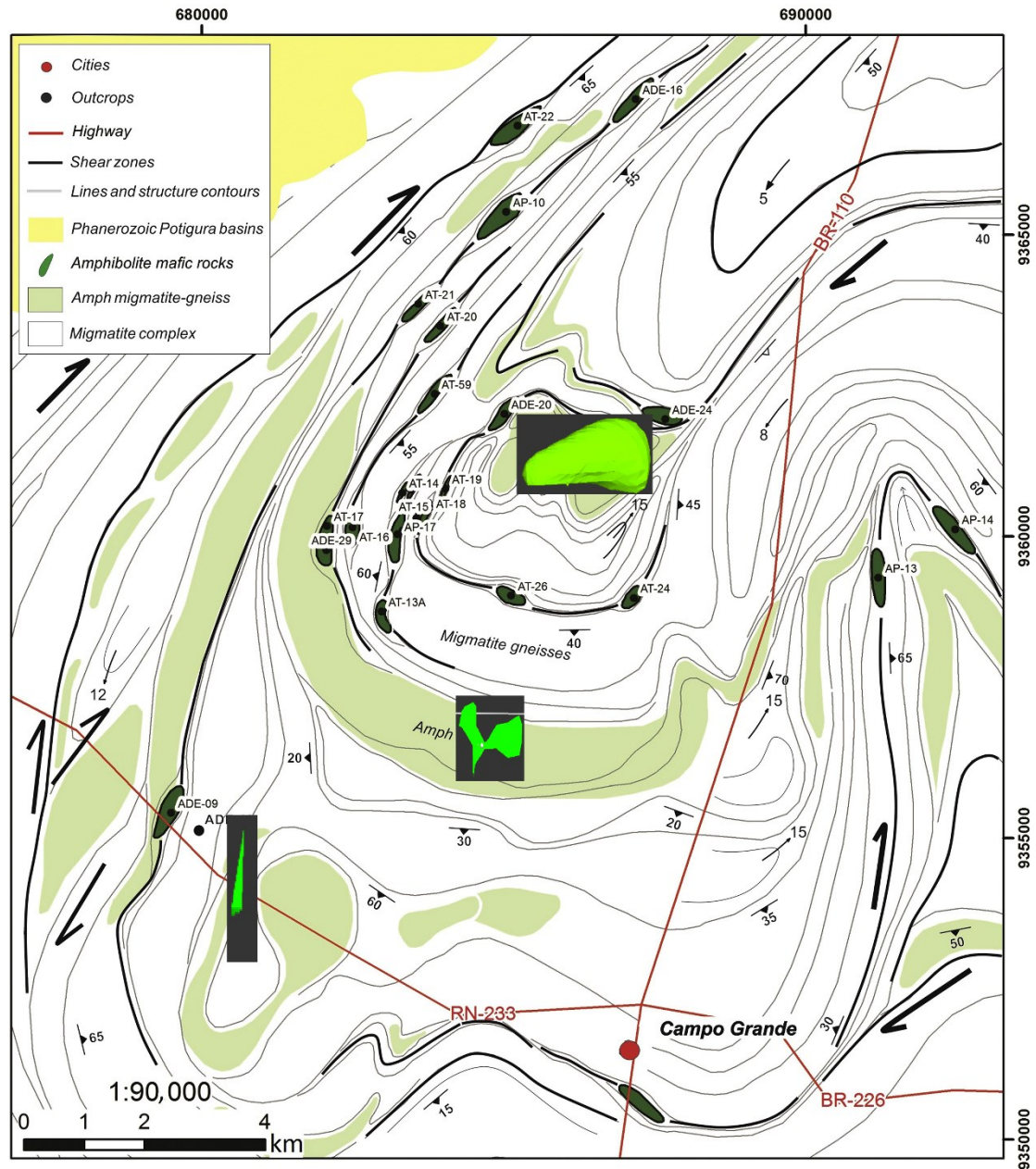


Fonte: O autor

Seguindo o mapa confeccionado por Ferreira et al. (2020) os corpos “C3” correspondem a gnaisses-migmatitos anfibolíticos, que apresentam uma condutividade melhor devido ao alto teor de metais presentes no magma gerador.

A localização dele assim como o “C1” pode ser correlacionada com o mapa, além de que a interação que ocorre com o “R1” é representada de maneira semelhante tanto no mapa desenvolvido pelo Ferreira et al. (2020) quanto no modelo apresentado no trabalho, como observado nas figuras 23 e 25 respectivamente.

Figura 23 Corpos rochosos "C3" dispostos no mapa da região

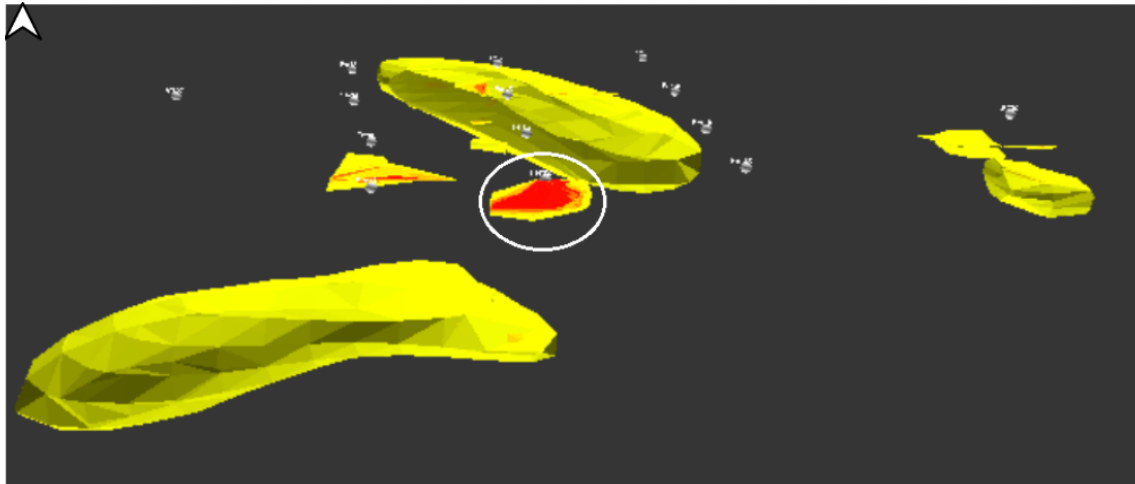


Fonte: Modificado de Ferreira et al. (2020)

6.1.2 Superfície transicional “C2”

O “C2” corresponde a um material transicional entre o “C1” e o “C3”, por esse motivo apresenta-se de maneira envoltória aos corpos “C1”, esse comportamento pode ser observado na figura 24.

Figura 24 Modelo 3D da superfície transicional "C2"



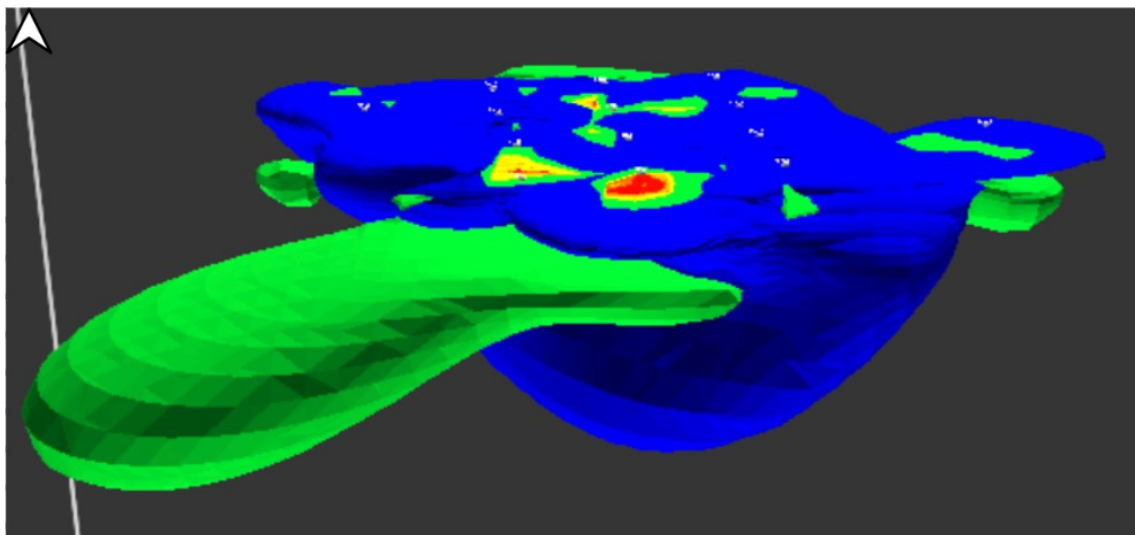
Fonte: O autor

O corpo “C2” praticamente se sobrepõe ao corpo “C1”, essa feição fica bem evidenciada no corpo de “C1” central destacado através do círculo branco. Esse tipo de comportamento representa uma mudança de resistividade mais suave e cadenciada.

6.1.2 Resistor “R1”

O corpo “R1” está localizado no centro da área de estudo entre os dois corpos “C3” e abriga alguns corpos de “C1” e “C3” no seu interior como observado na figura 25.

Figura 25 Modelo 3D com os corpos "C1", "C2", "C3" e "R1"

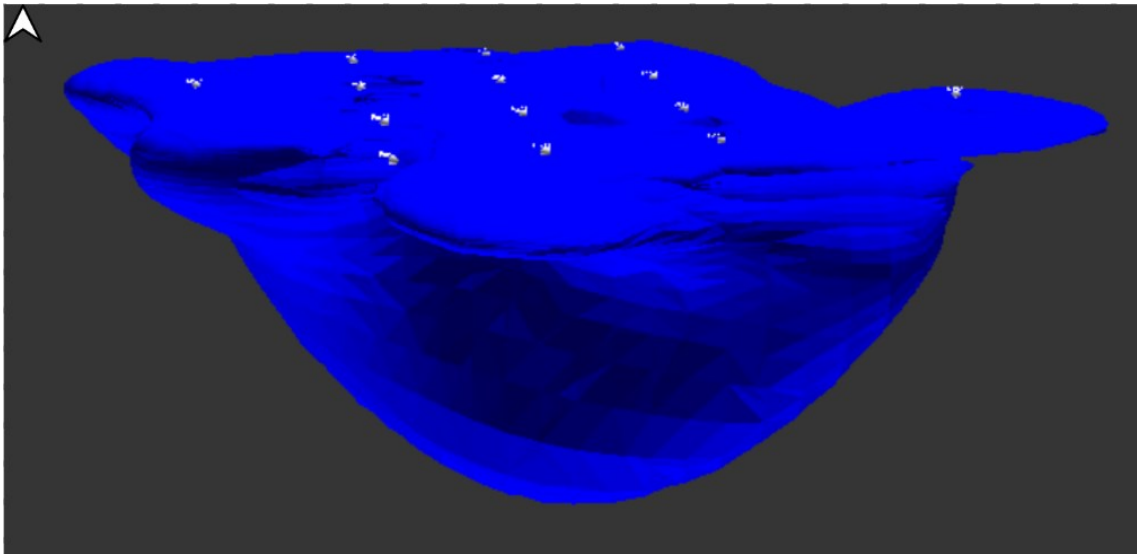


Fonte: O autor

É possível identificar estruturas similares a dutos ascendentes espalhados no interior e na região mais periférica do corpo “R1”, esses dutos geralmente estão preenchidos por materiais mais condutores, sendo o “C1” ou o “C3” como mostrado na figura 25.

O “R1” apresenta uma forma elipsoidal que foi alterada ao longo do tempo, como representado na figura 26, devido a intensa deformação causada pelos eventos tectônicos que agiram sobre a área.

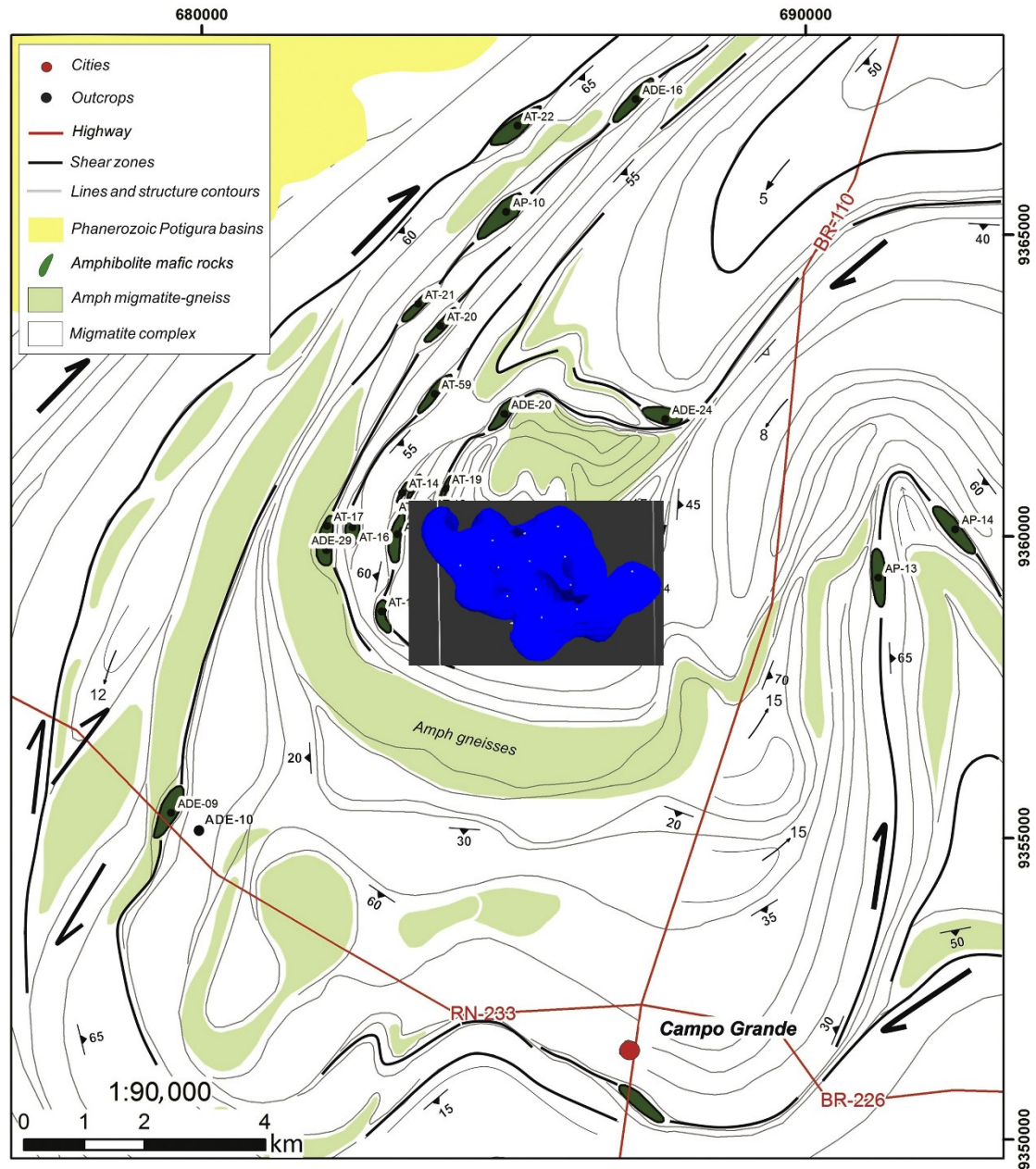
Figura 26 Modelo 3D do corpo rochoso "R1"



Fonte: O autor

O corpo “R1” foi identificado como um complexo gnaisse migmatítico por Ferreira et al. (2020). Ao alocarmos no mapa, é possível observar a ação de cisalhamento dextral nas extremidades do corpo, como demonstrado na figura 27.

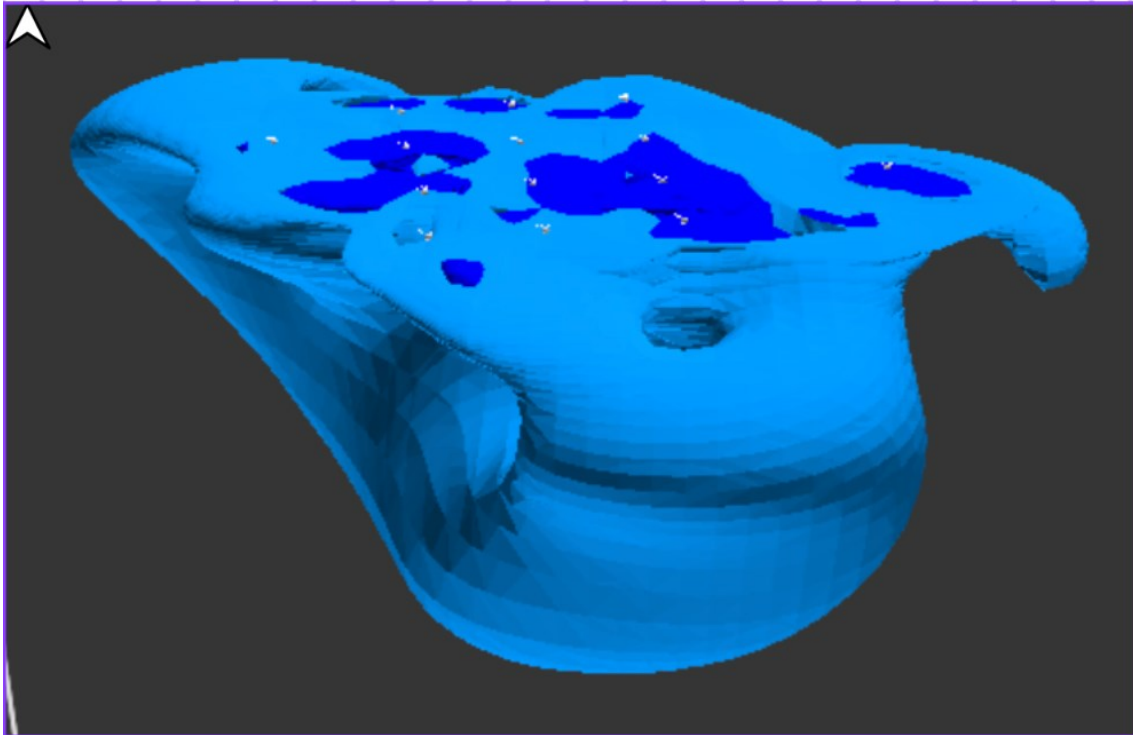
Figura 27 “R1” posicionado sobre o mapa geológico do núcleo Arqueano



Fonte: Modificado de Ferreira et al. (2020)

Conforme a distância do núcleo aumenta a resistividade diminui, sendo possível discriminar o corpo “R2”, representado pelo azul mais claro, evidenciado na figura 28, que apresenta um condutibilidade maior que o “R1”, isso ocorre devido a presença dos demais materiais condutores presentes próximo ao núcleo arqueano.

Figura 28 Modelo contendo os corpos "R1" e "R2"

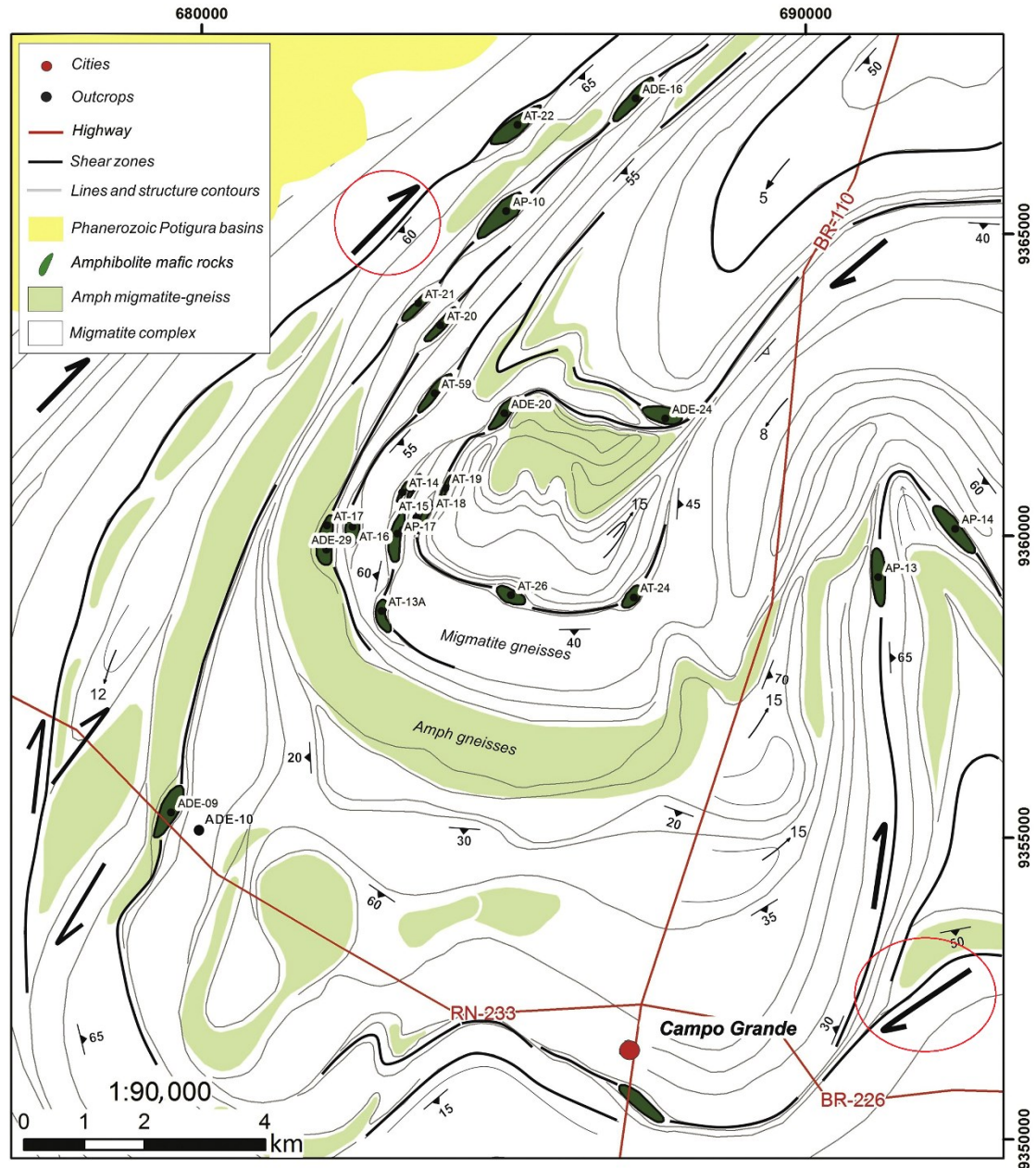


Fonte: O autor

6.2 Deformação em profundidade

A deformação das rochas da área de estudo está intrinsicamente ligada a atividade das duas zonas de cisalhamento que estão localizadas a leste e a oeste e estão demarcadas por círculos vermelhos na figura 29.

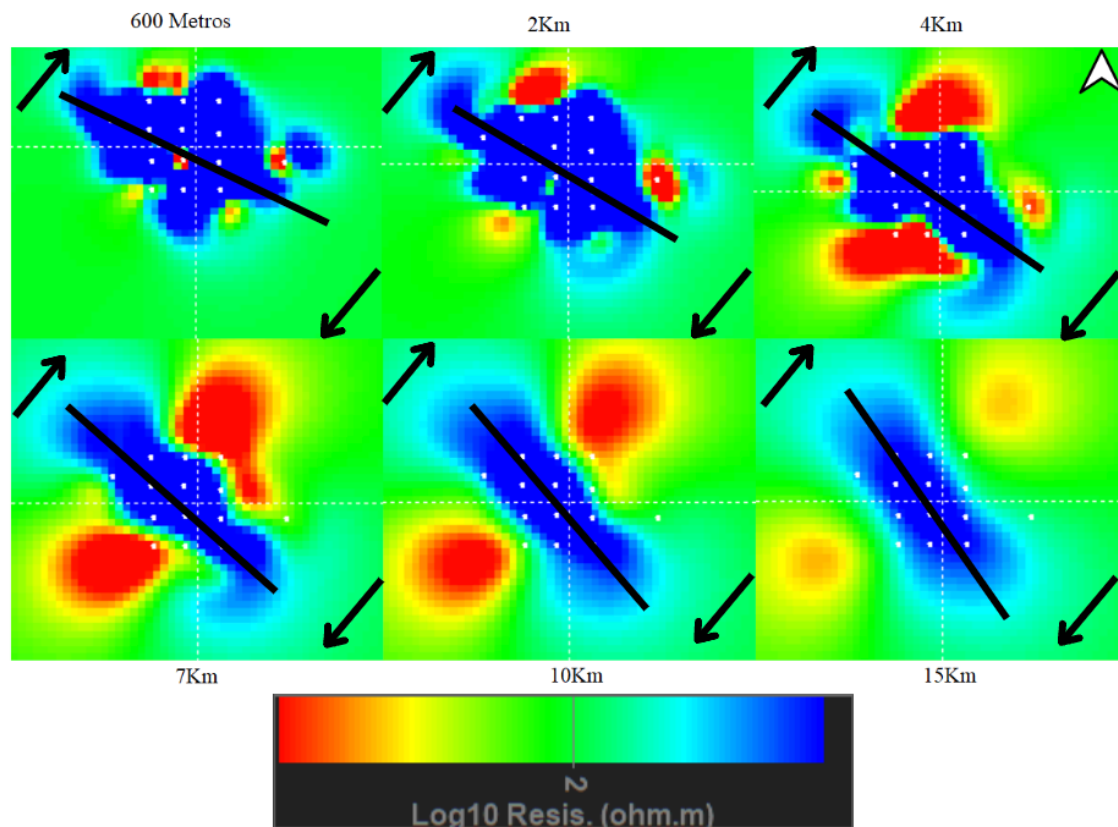
Figura 29 Zonas de cisalhamento que tem maior influência no núcleo arqueano, destacadas através dos círculos vermelhos



Fonte: Modificado de Ferreira et al. (2020)

O corte em planta possibilita o acompanhamento da deformação em profundidade, desse modo facilitando a compreensão do movimento rotacional que ocorreu devido as zonas de cisalhamento, como ilustrado na figura 30.

Figura 30 Cortes em planta evidenciando a ação das zonas de cisalhamento presentes na região



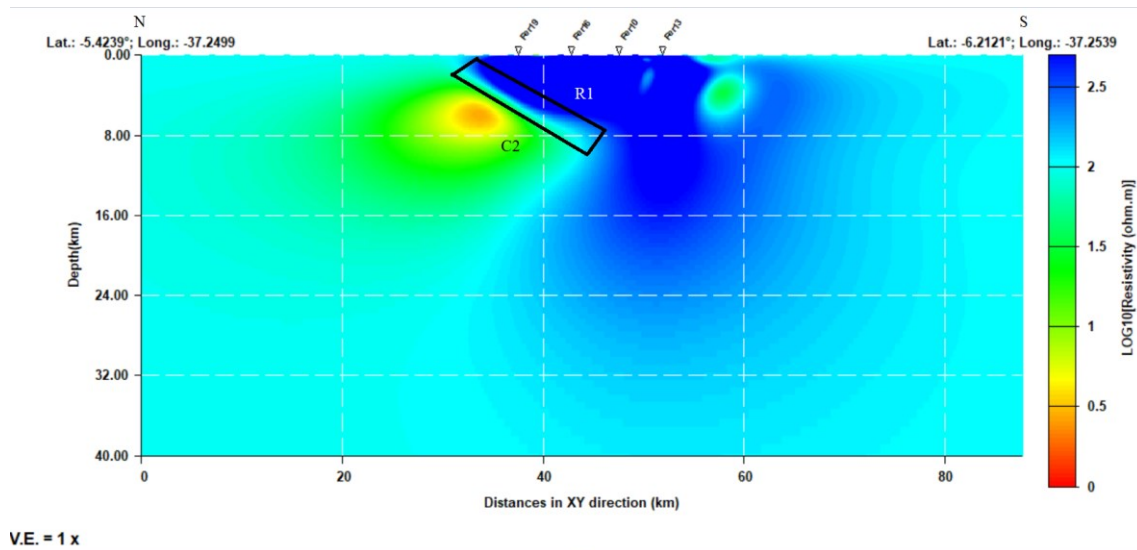
Fonte: O autor

O cisalhamento se desenvolve de maneira dextral, onde a diferença de reologia das rochas também é evidenciada, pois os materiais condutores estão se deformando em um nível superior aos resistores.

Foi utilizado uma base diferente de variação de resistividade para realçar o comportamento dos condutores, desse modo foi observado que além de serem mais afetados pela deformação também se manifestam em maiores quantidades em maiores profundidades.

Ao traçar perfis N-S e E-W sobre o corpo “R1” foi possível determinar feições estruturais como falhas e definir a profundidade máxima do corpo “R1”. A localização dos perfis utilizados estão representadas na figura 33. Abaixo temos 2 perfis, um E-W e o N-S que estão localizados na região Sul e Leste da área de estudo respectivamente, representados na figura 31 e 32, sendo possível identificar falhas, destacadas em preto, na interface de contato entre o “R1” e o “C3”.

Figura 31 Perfil Vertical N-S a leste da área de estudo

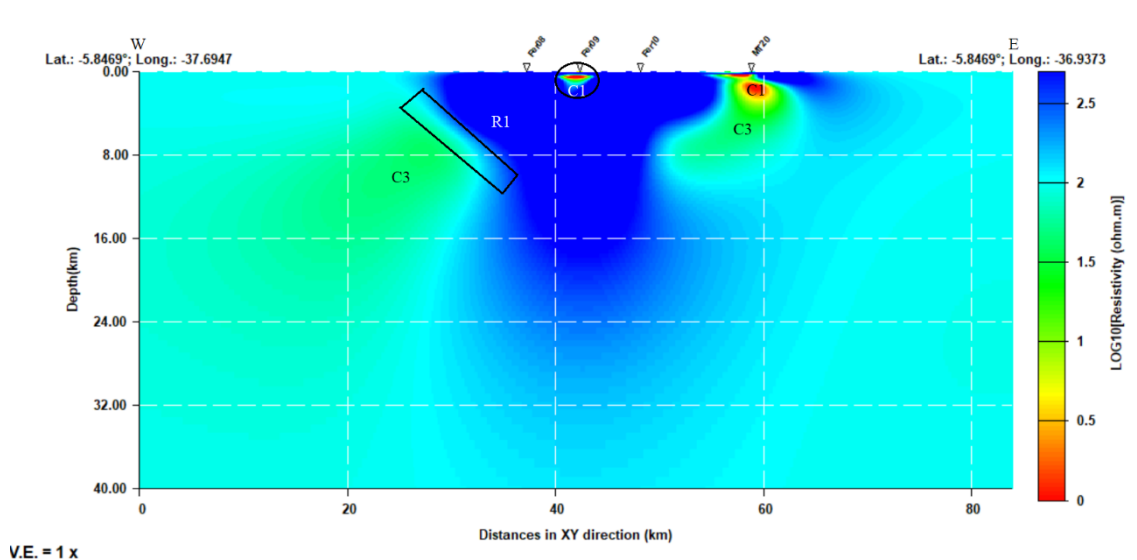


Fonte: O autor

Nesse perfil o “R1” apresenta uma profundidade de 24 quilômetros, assim como uma deformação compressiva em 8 quilômetros.

No perfil seguinte foi identificado outra falha, destacada pelo retângulo e uma estrutura circular, preenchida pelos corpos condutores, condizente com a modelagem proposta para a relação entre o “R1” e o “C1”.

Figura 32 Perfil vertical E-W, localizado ao sul da área de estudo



Fonte: O autor

O “R1” manteve os 24 quilômetros de profundidade, contudo a deformação que ocorre nos 8 quilômetros foi menos intensa.

Esse padrão de falhas acontece com frequência nos contatos entre o “R1” e o “C3”, desse modo o movimento de massa causado pela zona de cisalhamento pode ter ativado essas falhas que facilitaram e hospedaram os movimentos dos corpos “C3”.

A figura 33 indica a posição dos perfis das seções elétricas interpretadas nas figuras 31 e 32, já a figura 34 demarca a disposição das estações de coleta MT em relação ao mapa de Ferreira et al.(2020).

31

Figura 33 Localização dos perfis criados

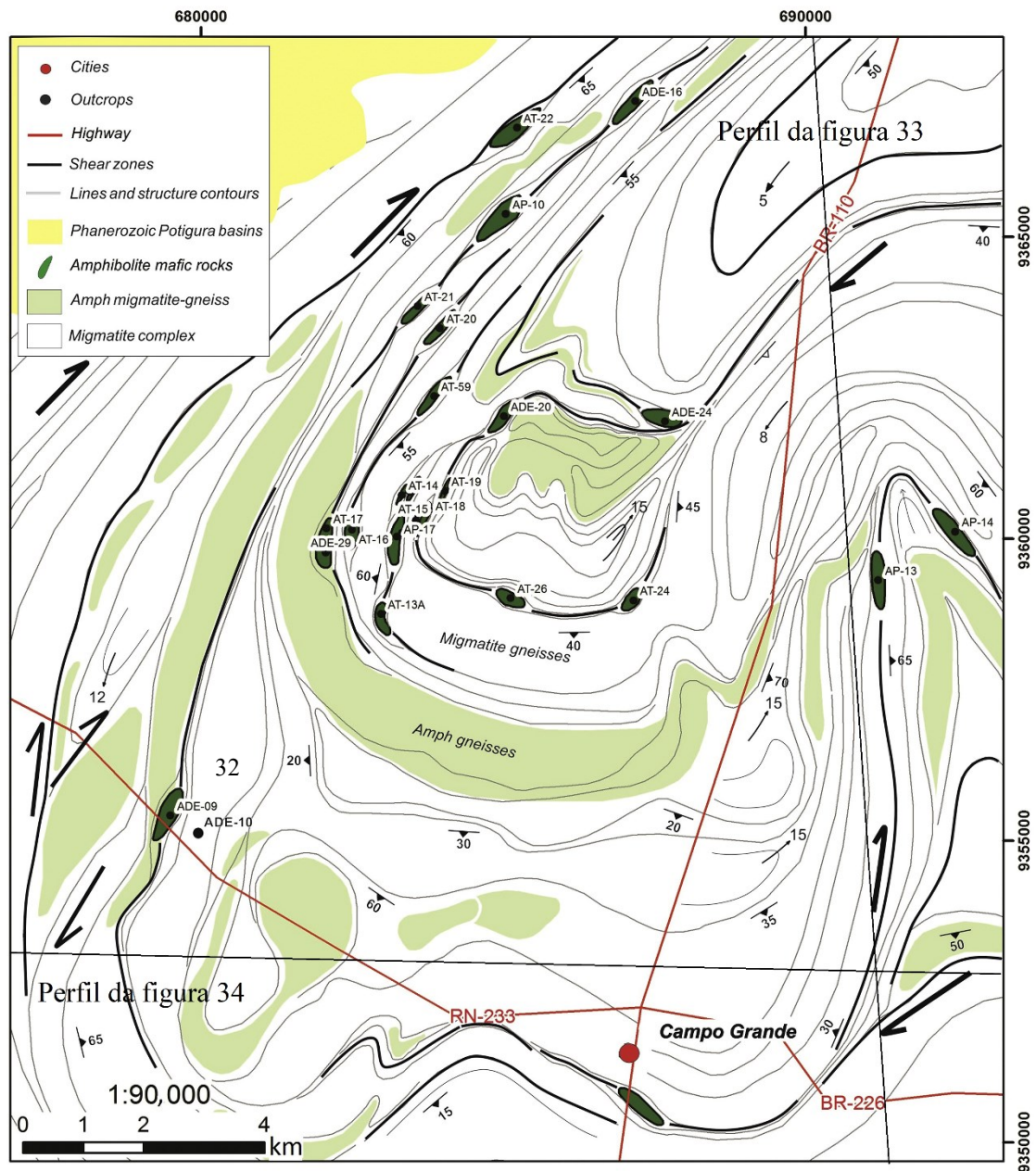
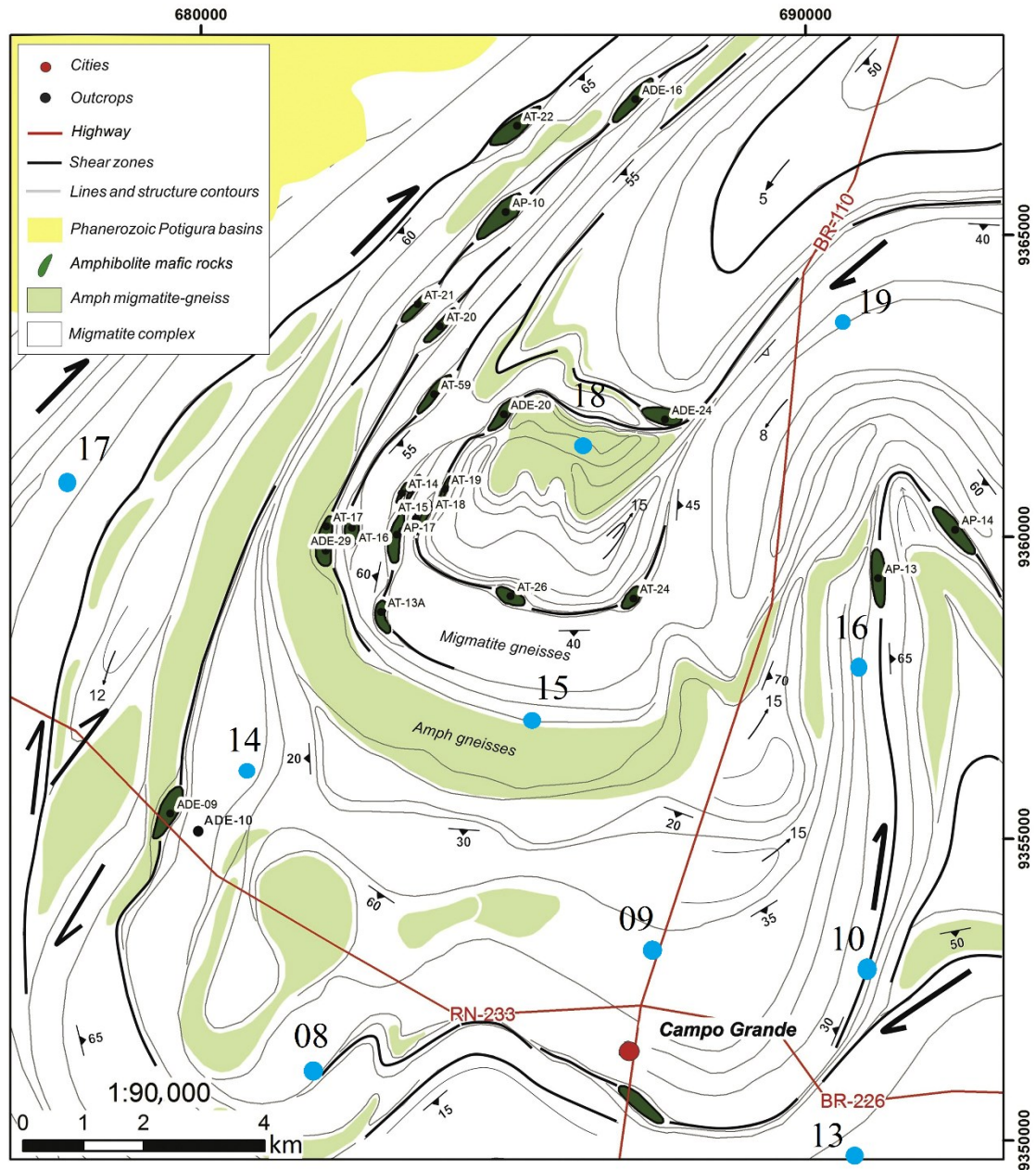


Figura 34 Mapa do Núcleo Arqueano do Rio Grande do Norte, com a disposição das estações de coleta



Fonte: Modificado de Ferreira et al. (2020).

7 CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foi desenvolvido um modelo de resistividade elétrica a partir da inversão das componentes do tensor impedância, com rms de 7% e através dele observar a geometria dos corpos rochosos presentes em subsuperfície.

Os produtos gerados neste trabalho apresentam boa correlação com os resultados apresentados por Ferreira et al. (2020) no trabalho “*High-pressure metamorphic rocks in the*

Borborema Province, Northeast Brazil: Reworking of Archean oceanic crust during proterozoic orogenies” gerando um embasamento mútuo para ambos os trabalhos.

Devido a diferença da variação de resistividade entre os corpos, foi determinado uma correspondência dos corpos rochosos dos modelos com as litologias mapeadas por Ferreira et al. (2020) na área. Principalmente no contexto de forma e distribuição dos corpos lenticulares anfibolíticos, assim como as resposta estruturais causadas pelas deformações gerada pelas zonas de cisalhamento presentes ao redor e outros processos de deformação que possam ter remodelado o núcleo arqueano.

Sendo “C1” de variação de 0.1 ohm.m relacionados com os anfibolitos ultramáficos; o “C3” com os Gnaisses-migmatitos anfibolíticos com uma variação de 1 à 1.5 ohm.m; o “R1” de variação de 2 à 2.5 ohm.m foi relacionado como um complexo gnaiss migamítico. Já o “C2” e o “R2” são considerados zonas transicionais entres os corpos condutivos e resistivos.

O modelo mostra um movimento dextral de cisalhamento, um espalhamento NE-SW apresentado pelo “C3”, além de um conjunto de falhas inversas que estão localizadas ao longo das regiões de contato entre o “C3” e o “R1”.

O modelo obtido pela inversão desenvolvido no trabalho utiliza dados disponibilizados pelo INCT/Estudos Tectônicos e coletados pelo laboratório de geofísica da Universidade Federal do Ceará, para o programa de Pós-graduação em Geologia da Universidade de Brasília.

Desse modo constata-se que os produtos gerados por esse trabalho são de natureza preliminar e que os resultados definitivos serão publicados em data posterior. Assim recomenda-se uma maior quantidade de aquisições magnotelúricas na Província Borborema e no resto do Brasil afim de melhorar a quantidade de informação disponíveis sobre as regiões a fim de facilitar a interpretação dos eventos de deformação que moldaram o planeta.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alanielson da Câmara Dantas Ferreira, Elton Luiz Dantas, Ticiano José Saraiva dos Santos, Reinhardt A. Fuck, Mahyra Tedeschi, *High-pressure metamorphic rocks in the Borborema Province, Northeast Brazil: Reworking of Archean oceanic crust during proterozoic orogenies*, *Geoscience Frontiers*, Volume 11, Issue 6, 2020, Pages 2221-2242, ISSN 1674-9871 <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2020.03.004>

ARCHANJO, C. J.; HOLLANDA, M. H. B. M.; SOUZA, Z. S.; VAN SCHMUS, W. R. *Tectonic framework of the Seridó Fold Belt, Borborema Province. Precambrian Research*, v. 226, p. 1-17, 2013.

ARTHAUD, M. H.; DANTAS, E. L.; FUCK, R. A.; SANTOS, T. J. S. *Tectonic evolution of the Borborema Province, NE Brazil. Journal of South American Earth Sciences*, v. 25, n. 2, p. 249-277, 2008.

BRITO NEVES, B. B.; FUCK, R. A. *Aspects of the tectonic evolution of Brazil. Precambrian Research*, v. 253, p. 49-74, 2014.

BRITO NEVES, B. B.; SANTOS, E. J.; VAN SCHMUS, W. R. *Tectonic history of the Borborema Province. Journal of South American Earth Sciences*, v. 13, n. 2, p. 135-145, 2000.

CAGNIARD, L. *Basic theory of the magneto-telluric method of geophysical prospecting. Geophysics*, v. 18, n. 3, p. 605-635, 1953. <https://doi.org/10.1190/1.1437915>

CAMPBELL, W.H. *An introduction to quiet daily geomagnetic fields. Pure and Applied Geophysics*, v. 131, n. 3, p. 315-331, 1989. <https://doi.org/10.1007/BF00876831>

CHAPMAN, S.; BARTELS, J. *Geomagnetism. Vol. 1. Oxford: Oxford University Press, 1940.*

CHAPMAN, S.; PRICE, A.T. *The electrical conductivity of the Earth as a function of depth. Geophysical Journal International*, v. 3, n. 3, p. 201-213, 1930.

CHAVE, A. D.; JONES, A. G. *The Magnetotelluric Method: Theory and Practice. Cambridge: Cambridge University Press, 2012.* <https://doi.org/10.1017/CBO9781139020138>

CORSINI, M.; ARTHAUD, M. H.; VAN SCHMUS, W. R.; DANTAS, E. L. *Age and evolution of crust in the Borborema Province, NE Brazil. Geological Society of America Bulletin*, v. 103, n. 9, p. 1191-1205, 1991.

DANTAS, E. L.; VAN SCHMUS, W. R.; OLIVEIRA, E. P.; ARCHANJO, C. J. *U-Pb zircon ages of rocks from the Borborema Province, NE Brazil. Precambrian Research*, v. 132, n. 3-4, p. 339-359, 2004.

EGBERT, G. D.; KELBERT, A. *Computational recipes for electromagnetic inverse problems. Geophysical Journal International*, v. 189, n. 1, p. 251-267, 2012. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2011.05347.x>

ESPOSITO, R. Aplicação do Método Magnetotelúrico em ambientes sedimentares: estudo de caso na área do Pecém (Ceará, Brasil) e simulações teóricas para pesquisa de óleo e gás na porção emersa da Bacia Potiguar (Rio Grande do Norte, Brasil). 2016. Tese (Doutorado em Geologia) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016

FERREIRA, C. M.; DANTAS, E. L.; SANTOS, L. C. M.; HOLLANDA, M. H. B. M. *The basement of the Borborema Province: Age and evolution. Brazilian Journal of Geology*, v. 49, n. 3, p. 627-641, 2019.

FRIGO, E. *Modelagem da estrutura do campo magnético terrestre utilizando harmônicos esféricos*. 2023. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023.

GALINDO, A. C. *The tectonics of Borborema Province. Geotectonics*, v. 27, n. 4, p. 320-339, 1993.

GANADE, C. E.; VAN SCHMUS, W. R.; SOUZA, Z. S.; BRITO NEVES, B. B. *Geological evolution of the Borborema Province. Geological Society of America Bulletin*, v. 126, n. 3-4, p. 563-590, 2014.

GRAY, G. G.; ARCHANJO, C. J.; VAN SCHMUS, W. R. *The geodynamics of the Borborema Province. Tectonophysics*, v. 465, n. 1-4, p. 223-239, 2008.

HIRAYAMA, M. *Simultaneous measurements of time-varying surface electric and magnetic fields at Toyohara, Japan. Journal/Periódico*, v. 1, n. 1, p. 1-10, 1934.

HOLLANDA, M. H. B. M.; DANTAS, E. L.; VAN SCHMUS, W. R. *Geological framework of the Rio Grande do Norte domain. Journal of South American Earth Sciences*, v. 32, n. 3, p. 240-258, 2011.

HOLLANDA, M. H. B. M.; SOUZA, L. C.; FERREIRA, C. M. *The Seridó Group in the Borborema Province. Brazilian Journal of Geology*, v. 45, n. 1, p. 55-75, 2015.

JARDIM DE SÁ, E. F. Geologia e tectônica da Província Borborema. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 24, n. 1, p. 41-60, 1994.

LANGEL, R. A.; ESTES, R. H. *Large-scale, near-field magnetic fields from external sources and the corresponding induced internal field. Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, v. 90, n. B3, p. 2487-2494, 1985. <https://doi.org/10.1029/JB090iB03p02487>

MACKIE, R. L.; SMITH, J. T.; MADDEN, T. R. *Three-dimensional electromagnetic modeling using finite difference equations: The magnetotelluric example*. *Radio Science*, v. 29, n. 4, p. 923-935, 1994. <https://doi.org/10.1029/94RS00326>

NEVES, A. S. *The magnetotelluric method in two-dimensional structures: Ph.D. thesis*. *Massachusetts Institute of Technology*, 1957.

OLIVEIRA, K. M. L. Integração de dados geofísicos (magnetometria, gravimetria e magnetotelúrico) na borda nordeste da Bacia do Parnaíba, NW do Ceará. 2016. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016

SILVA, J. B. C. Interpretação de dados de eletromagnetometria de fonte controlada (CSEM) em modelos 1D e 2D. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, 2002

STANLEY, W. D.; SMITH, R. B.; ZOBACK, M. L. *Magnetotelluric study of the Yellowstone geothermal area, Wyoming*. *Geophysics*, v. 42, n. 7, p. 1395-1413, 1977

OLIVEIRA, E. P.; MEDEIROS, W. E. *Mantle-crust interactions in the Borborema Province*. *Lithos*, v. 296-297, p. 294-307, 2018.

PÁDUA, M. B. de. Estudo da indução eletromagnética na caracterização de estruturas profundas sob a borda sul do cráton de São Francisco. 2005. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2005.

PÁDUA, M. B. de. Cálculo do tensor magnetotelúrico resistente a valores anômalos e pontos de influência. 2014. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial/Ciências do Ambiente Solar-Terrestre) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2014.

PADILHA, A. L.; VITORELLO, I.; BRITO NEVES, B. B. *Electrical resistivity structure of the Borborema Province*. *Precambrian Research*, v. 292, p. 298-311, 2017.

PADILHA, A. L.; RASSOULIAN, M.; CORDANI, U. G. Investigação magnetotelúrica na região centro-sudeste do Brasil: implicações para a estrutura da litosfera. 8º Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica, 2001.

PEDROSA JR, N. C.; LIMA, J. P.; CORDANI, U. G.; FUCK, R. A. *Structural framework of the Jaibaras Rift, Brazil, based on geophysical data*. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 58, p. 281-294, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2014.07.005>

RHEE, J.W. *Gaussian Elimination: Solving Systems of Linear Equations. Mathematics Magazine*, v. 83, n. 5, p. 378-384, 2010.

RIKITAKE, T. *Notes on electromagnetic induction within the Earth. Bulletin of the Earthquake Research Institute*, v. 29, p. 101-113, 1951.

RODI, W.; MACKIE, R. L. *Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversion. Geophysics*, v. 66, n. 1, p. 174-187, 2001 <https://doi.org/10.1190/1.1444893>

SANTOS, A. C. L. dos. *Imageamento magnetotelúrico de estruturas da litosfera na porção SE da Província Borborema. Tese de Doutorado No 107. Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geologia. Brasília - DF, 2012.*

SANTOS, E. J.; VAN SCHMUS, W. R.; BRITO NEVES, B. B. *Terrane accretion and evolution in the Borborema Province. Gondwana Research*, v. 13, n. 4, p. 475-487, 2008.

SCHUSTER, A. *The diurnal variation of terrestrial magnetism. Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, v. 180, p. 467-518, 1889. <https://doi.org/10.1098/rsta.1889.0015>

SILVA, Fabiano M. *Aplicação de métodos geofísicos, geológicos e detecção remota, na investigação da sismicidade induzida na barragem do Castanhão, região nordeste do Brasil. 2018. Tese (Doutorado em Ciências Geofísicas e da Geoinformação) – Universidade de Lisboa, Faculdade de Ciências, Lisboa, 2018.*

SILVA, Nilton Cesar Vieira. *Estrutura geoeétrica da crosta superior revelada por dados magnetotelúricos 2d na bacia do Jaibaras, NW do Ceará. 2016. 97 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) -Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.*

SIMPSON, F.; BAHR, K. *Practical Magnetotellurics. Cambridge University Press, Cambridge, 270p., 2005. https://doi.org/10.1017/CBO9780511614095*

SOUZA, L. C.; DANTAS, E. L.; ARTHAUD, M. H. *High-K calc-alkaline magmatism in the Borborema Province. Precambrian Research*, v. 158, n. 1-2, p. 175-195, 2007.

STRANG, G. *Introduction to Linear Algebra. Wellesley-Cambridge Press, 2016.*

TIKHONOV, A. N. *On determination of electric characteristics of deep layers of the Earth's crust. Doklady Akademii Nauk SSSR*, v. 73, p. 295-297, 1950.

TRINDADE, R. I. F.; VAN DER VOO, R.; BRITO NEVES, B. B. *Paleomagnetism of Neoproterozoic rocks from the Borborema Province. Journal of Geophysical Research*, v. 104, n. B7, p. 15181-15196, 1999.

UCHÔA, E. B.; SILVA, N. C. V.; MAGINI, C.; BRANCO, R. M. G. C.; FUCK, R. A.; SILVA, F. M.; E SILVA, C. R. M. *Magnetotelluric transect across the São Luís cratonic fragment, the Gurupi belt and the Parnaíba basin, N-NE Brazil. Journal of South American Earth Sciences*, v. 104, 102888, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102888>

UCHÔA, E. B. Transecto magnetotelúrico entre o cráton São Luís, faixa gurupi e a bacia do Parnaíba, N-NE Brasil. 2020. 146 f. Tese (Doutorado em Geologia) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2020.

VAN SCHMUS, W. R.; OLIVEIRA, E. P.; SANTOS, E. J.; BRITO NEVES, B. B. *Age and evolution of the Borborema Province. Geological Society of America Bulletin*, v. 120, n. 1-2, p. 101-133, 2008.

VOZOFF, K. The Magnetotelluric Method. In: NABIGHIAN, M. N. (Ed.). *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, 1991. p. 641-711 <https://doi.org/10.1190/1.9781560802686.ch8>