



UNIVERSIDADE FEDERAL
DE UBERLÂNDIA

UNIVERSIDADE FEDERAL DE
UBERLÂNDIA



LETÍCIA LONARDI SILVA LOPES

Inversão e modelagem magnetotelúrica no
Domínio Tectônico do Rio Grande do Norte.

Monte Carmelo – MG

2025

LETÍCIA LONARDI SILVA LOPES

**Inversão e modelagem magnetotelúrica no
Domínio Tectônico do Rio Grande do Norte.**

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 Motta da Silva

Monte Carmelo – MG

2025

LETÍCIA LONARDI SILVA LOPES

Inversão e modelagem magnetotelúrica no
Domínio Tectônico do Rio Grande do Norte.

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.

Monte Carmelo – MG, 2025

Banca examinadora:

Prof. Dr. Fabiano Mota da Silva – Orientador (UFU)

Prof. Dr. Christiano Magini – Avaliador (UFC)

Prof. Msc. Marcos César Soares de Queiroz – Avaliador (UNB)

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

L864 Lopes, Letícia Lonardi Silva, 1997-
2025 Modelagem de inversão 3D e interpretação magnetotelúrica entre os municípios de Itaú a Paraú no domínio tectônico do Rio Grande do Norte, Nordeste do Brasil [recurso eletrônico] : Modelagem de inversão 3D e interpretação magnetotelúrica entre os municípios de Itaú a Paraú no domínio tectônico do Rio Grande do Norte, Nordeste do Brasil / Letícia Lonardi Silva Lopes. - 2025.

Orientador: Fabiano Mota da Silva.
Coorientador: Christiano Magini.
Coorientador: Marcos César Soares de Queiroz.
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, 1985-, (Orient.). II. Magini, Christiano, -, (Coorient.). III. Queiroz, Marcos César Soares de, -, (Coorient.). IV. Universidade Federal de Uberlândia. Graduação em Geologia. V. 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

Gostaria de começar agradecendo primeiramente a Deus, que me deu forças, coragem e serenidade para enfrentar cada desafio ao longo dessa caminhada acadêmica. Sem Ele, nada disso teria sido possível.

Aos meus pais, Everton e Tatiane, que sempre foram meu alicerce, minha inspiração e meu porto seguro. A vocês devo tudo, pois me ensinaram o valor do esforço, da honestidade e do amor.

Aos meus irmãos, Guilherme e Julia, que com carinho e cumplicidade tornaram a jornada mais leve.

Agradeço imensamente aos meus avós, Lourdes e Nora, que sempre acreditaram em mim, me incentivaram e me apoiaram em cada etapa deste processo. Aos meus tios, Marcílio, Clarissa e Eduardo, pelo carinho, pelas palavras de encorajamento e pela torcida constante. À minha família materna, que nunca mediu esforços para me ver seguir um bom caminho e que, de diferentes formas, contribuiu para que eu chegasse até aqui.

Aos amigos que a graduação me deu, Carol Teixeira, Pretinho, Canedo e Carol Barreto, obrigada por estarem presentes no dia a dia, dividindo comigo não apenas as dificuldades, mas também os sorrisos, aprendizados e conquistas. Ter vivido essa experiência incrível ao lado de vocês foi um dos maiores presentes dessa etapa.

Meu sincero agradecimento ao meu orientador, professor Fabiano Mota, pelo apoio, paciência e, principalmente, por todo o conhecimento compartilhado ao longo dessa trajetória.

Enfim, obrigada UFU, esses anos foi palco de tantos momentos importantes da minha vida, cresci, aprendi e construí memórias que levarei comigo para sempre. Não poderia deixar de dar o meu muito obrigada a cidade de Monte Carmelo que foi minha casa durante esses anos, me trouxe inúmeros sentimentos novos e uma força inimaginável para lidar com a vida.

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo geofísico baseado no método magnetotelúrico (MT) aplicado ao Domínio Tectônico do Rio Grande do Norte, situado na Província Borborema, Nordeste do Brasil. O objetivo principal foi desenvolver e interpretar modelos tridimensionais (3D) de resistividade elétrica, visando compreender as principais estruturas crustais e sua relação com a compartimentação tectônica regional. Foram utilizados dados de 12 estações MT distribuídas ao longo de um perfil Leste-Oeste entre os municípios de Itaú e Paraú (RN). O processamento incluiu filtragem de ruídos elétricos utilizando o código FIR-TSMP e cálculo do tensor de impedância a partir das séries temporais processadas no software MAPROS. A inversão 3D dos dados foi realizada no código ModEM3D, com erro *floor* de 5% e valor de ajuste (RMS) final de 4,12. Os resultados revelaram fortes contrastes de resistividade elétrica, que permitiram identificar corpos resistivos associados ao Bloco Jaguaretama, ao Complexo Campo Grande e à Suíte Granítica Umarizal, bem como zonas condutivas relacionadas às Zonas de Cisalhamento de Portalegre e Paraú. Essas estruturas evidenciam a compartimentação crustal do Domínio Rio Grande do Norte e sua evolução tectônica ligada à Orogenia Brasiliiana. O estudo demonstra a eficiência da inversão magnetotelúrica 3D para caracterizar a arquitetura geológica profunda da Província Borborema, fornecendo subsídios para futuras investigações geotectônicas e para a identificação de áreas com potencial mineral.

Palavras-chave: Magnetotelúrico; Inversão 3D; Geotectônica; Província Borborema.

ABSTRACT

This work presents a geophysical study based on the magnetotelluric (MT) method applied to the Rio Grande do Norte Tectonic Domain, located in the Borborema Province, Northeast Brazil. The main objective was to develop and interpret three-dimensional (3D) resistivity models to characterize the principal crustal structures and understand their tectonic significance. A total of 12 MT stations were deployed along an East–West profile between the municipalities of Itaú and Paraú (RN). Data processing included electrical-noise filtering using the FIR–TSMP algorithm and impedance tensor estimation in the MAPROS software. The 3D inversion was performed using the ModEM3D code, with a 5% error floor and a final root-mean-square (RMS) of 4.12. The resulting models revealed pronounced resistivity contrasts, allowing the identification of resistive crustal domains associated with the Jaguaretama Block, Campo Grande Complex, and Umarizal Granite Suite, as well as conductive zones that correlate with the Portalegre and Paraú Shear Zones. These features highlight the crustal compartmentalization of the Rio Grande do Norte Domain, consistent with tectonic processes linked to the Brasiliano Orogeny. This study demonstrates the effectiveness of 3D MT inversion in imaging the deep geological architecture of the Borborema Province and provides valuable insights for future geotectonic investigations and potential mineral exploration.

Keywords: Magnetotellurics; 3D Inversion; Geotectonics; Borborema Province.

LISTA DE IMAGENS

Figura 1: Modelo de estação de Magnetotelúrica (MT).	11
Figura 2: Mapa de Localização da área de disposição das estações de coleta MT	13
Figura 3: Sistemas MT, suas fontes de sinais e período de aquição.	19
Figura 4: Equipamentos utilizados na aquisição de dados MT em campo. O arranjo adotado acima foi aplicado para todas demais estações.	20
Figura 5: Fluxograma representando o processamento dos dados adquiridos.....	21
Figura 6: Relação frequência/tempo dos dados.	23
Figura 7: Dados de frequência de 4096Hz da estação 9 com ruídos.	23
Figura 8: Código TSMP sendo aplicado para remover os ruídos identificados na imagem 7..	24
Figura 9: Dados de frequência de 4096 da estação 9 após retirada dos picos de ruídos.	24
Figura 10: Curva de resistividade e fase da frequência de 4096Hz coletados pela estação 9. .	25
Figura 11: Mapa Geológico com estacoes MT de Itaú a Paraú.	29
Figura 12: Modelo 3D contendo os grids de espaçamento nas direções Norte e Sul e profundidade.	30
Figura 13: Perfil de resistividade sob as estações E-W.	31
Figura 14: Perfil de resistividade E-W indicando as principais geometrias interpretadas.	32
Figura 15: Modelo de inversão 2D magnetométrico entre Itaú-Paraú.....	34
Figura 16: Integração do modelo de inversão 3D MT com o modelo de inversão aéromagnetico 2D de Itaú a Paraú.	35
Figura 17: Modelo de inversao 3D a partir do Tensor de fase.....	36
Figura 18: Modelo de inversão 3D do Tensor de fase com as principais estruturas geológicas presentes na área de estudo	36
Figura 19: Modelo tectonico do tipo detachment..	38
Figura 20: Modelo tectonico do tipo underplating.	38
Figura 21: Croqui esquemático do perfil Itaú - Paraú.....	40

SUMÁRIO

1. Introdução	10
1.1. Contextualização	10
1.2. Localização da Área de Estudo	12
1.3. Objetivos.....	14
1.3.1. Objetivos Gerais.....	14
1.3.2. Objetivos específicos	14
2. Embasamento Teórico	15
2.1. Metodologia	15
2.2 Princípios do Método Magnetotelúrico.....	17
2.2.1. Fundamentos Físicos	17
2.3. Fontes do Sinal Magnetotelúrico	18
2.4. Aplicação no MT	19
3. Materiais e Métodos	19
3.1 .Equipamentos e coleta	19
3.2. Processamento dos dados	21
3.2.1. Aquisição dos dados	22
3.2.2. Remoção dos ruídos.....	23
3.2.3. Tensor de Impedância.....	25
4. Configuração Geológica	26
4.1. Unidades Geológicas Interceptadas pela Linha Itaú–Paraú.....	26
4.1.1. Núcleos Arqueanos e Paleoproterozoicos	26
4.1.2. Sequências Neoproterozoicas (Ciclo Brasiliiano).....	27
4.1.3. Intrusões Graníticas Brasilianas.....	28
4.1.4. Zonas de Cisalhamento.....	28
4.2. Relevância para o Método Magnetotelúrico (MT)	29
5. Resultados Preliminares	30
6. Interpretação dos Modelos Geoelétricos e Integração Geofísica.....	32
7. Conclusões e considerações finais	39
Referências Bibliográficas	41

1. Introdução

O método magnetotelúrico (MT), inicialmente formalizado por Tikhonov (1950) e Cagniard (1953), constitui uma importante ferramenta para a investigação da estrutura elétrica da subsuperfície terrestre. Ele utiliza as variações naturais dos campos elétrico (E) e magnético (H) da Terra (Figura 1), geradas por descargas atmosféricas (altas frequências) e pela interação entre o vento solar, ionosfera e magnetosfera (baixas frequências) terrestre. Por ser um método passivo, capaz de investigar desde poucas centenas de metros até dezenas de quilômetros em profundidade, o MT tem se destacado em estudos crustais e litosféricos, especialmente em terrenos cristalinos (Simpson & Bahr, 2005; Chave & Jones, 2012; Padilha et al., 2022).

As variações dos campos eletromagnéticos são registradas em superfície por sensores ortogonais, permitindo o cálculo do tensor de impedância, base para as curvas de resistividade aparente e fase. A partir das impedâncias, técnicas de inversão numérica permitem estimar modelos 2D ou 3D de resistividade elétrica da crosta e litosfera superior. Esses modelos auxiliam na identificação de zonas de cisalhamento, intrusões graníticas, fragmentos de embasamento retrabalhado, bacias sedimentares, corpos máficos, condutores crustais e outras feições de relevância tectônica.

A Província Borborema é uma região caracterizada por seus terrenos neoproterozoicos, zonas de cisalhamento crustais profundas e núcleos arqueanos a paleoproterozoicos. O método MT tem demonstrado grande potencial na investigação de estruturas profundas que não são facilmente reconhecidas em superfície (Padilha et al., 2022; Romero, 2023). Nesse contexto, o Domínio Rio Grande do Norte apresenta feições estruturais de alto interesse geotectônico, como as Zonas de Cisalhamento de Paraú e Portalegre, que representam importantes zonas de fraqueza crustal.

O presente trabalho utiliza o método magnetotelúrico para investigar a subsuperfície ao longo do perfil Itaú–Paraú (RN), com o objetivo de obter modelos tridimensionais (3D) que permitam caracterizar as principais unidades crustais, seus contrastes geoelétricos e suas relações com a evolução tectônica regional.

1.1. Contextualização

O método geofísico magnetotelúrico (MT) foi inicialmente sistematizado por Cagniard (1953), que estabeleceu sua base teórica como técnica fundamental para a investigação da estrutura elétrica da subsuperfície terrestre. Diferente de métodos que

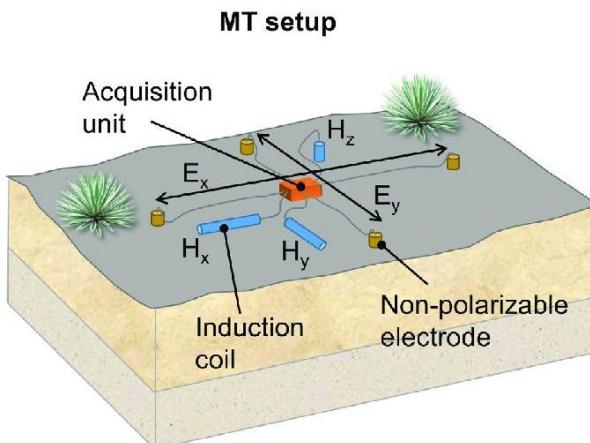
dependem de fontes artificiais de energia, o MT é classificado como método passivo, pois utiliza as variações naturais do campo eletromagnético da Terra. Nas últimas décadas, avanços significativos em instrumentação e processamento consolidaram a aplicação do MT em estudos da crosta continental e da litosfera, incluindo no Brasil, onde tem se mostrado eficaz para a caracterização de terrenos neoproterozoicos e zonas de cisalhamento crustal (Padilha et al., 2022; Romero, 2023).

A Província Borborema representa um mosaico de terrenos amalgamados durante a Orogenia Brasiliiana (650–540 Ma). O Domínio Rio Grande do Norte, inserido no setor setentrional da província, é marcado pela presença de blocos arqueanos/paleoproterozoicos como o Complexo Caicó e o Bloco Jaguaretama, cinturões neoproterozoicos como o Grupo Seridó, intrusões brasilianas como a Suíte Umarizal e o Complexo Campo Grande, zonas de cisalhamento crustais de alto porte (Paraú, Portalegre).

Essas unidades apresentam contrastes marcantes de resistividade elétrica, tornando o MT uma ferramenta adequada para mapear sua geometria e continuidade em profundidade. Zonas de cisalhamento, em particular, tendem a exibir maior condutividade devido à presença de minerais condutores, fluidos e grafita ao longo de planos miloníticos, constituindo alvos ideais para a inversão magnetotelúrica.

Dessa forma, a aplicação do MT no segmento Itaú–Paraú permite investigar a compartimentação crustal do domínio, contribuindo para a compreensão de sua evolução tectônica.

Figura 1: Modelo de estação de Magnetotelúrica (MT).



Fonte: Retirado de Bücker et al., 2017.

Através das variações naturais dos campos elétrico (E) e magnético (H) terrestre, é possível inferir a distribuição da resistividade/condutovidade elétrica a partir dos primeiros metros da crosta até centenas de quilômetros no manto superior. O uso do método geofísico MT apresenta-se como uma ferramenta importante para o aprofundamento do conhecimento sobre os processos geológicos que ocorreram a longo do tempo na Província Borborema por se tratar de uma extensa área de estudo, fazendo com o que a técnica utilizada seja mais útil em altas profundidades e com um custo benefício melhor em relação a outros métodos mais comuns de serem usados como as sísmicas de refração ou de reflexão, por exemplo.

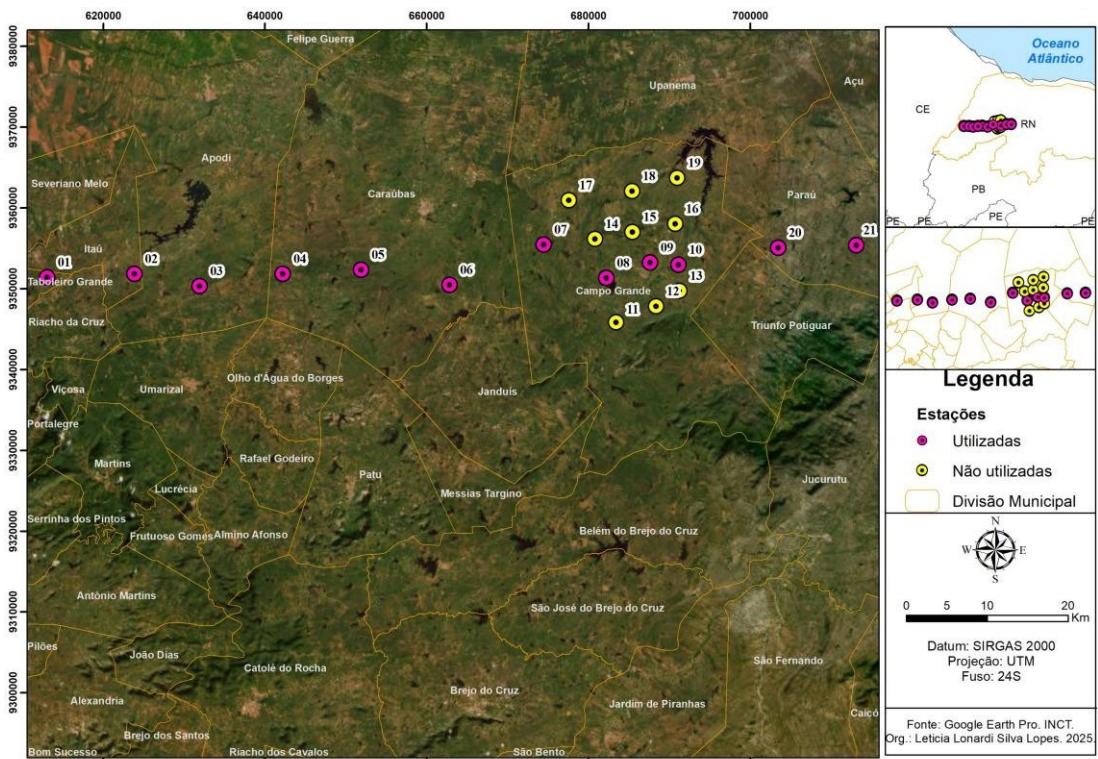
O presente trabalho consiste de um projeto do INCT (Institutos Nacionais de Ciência e Tecnologia) financiado pelo CNPq/Geotectônica em parceria com as Universidades: de Brasília, Federal do Ceará, Federal de Pernambuco e a Federal de Uberlândia, cujo objetivo, é a investigação das grandes estrutura geológica e tectônica da região próxima aos municípios de Itaú e Campo Grande, localizado no Estado do Rio Grande do Norte.

Para alcançar esse objetivo foi empregado o método geofísico de aquisição magnetotelúrica (MT), que permite a análise das variações naturais do campo eletromagnético tanto na superfície quanto em subsuperfície trazendo mais um compilado de dados que caracterizam o Complexo Campo Grande.

1.2.Localização da Área de Estudo

A área de estudo se situa a Nordeste do Brasil e a Oeste do Rio Grande do Norte (Figura 2), contemplando os municípios entre Itaú e Paraú.

Figura 2: Mapa de Localização da área de disposição das estações de coleta MT.



Fonte: Mapa elaborado pelo autor com base nos dados de estações coletados pelo INCT. 2025.

Abrange um perfil geofísico de aproximadamente 120 km de extensão entre os municípios de Itaú e Paraú (Figura 2). O perfil tem orientação Leste-Oeste, atravessando porções representativas do Domínio Rio Grande do Norte, inserido na Província Borborema.

As estações magnetotelúricas foram distribuídas ao longo da rodovia estadual RN-117 e vias secundárias adjacentes. Essa configuração possibilitou a amostragem de diferentes unidades geológicas, incluindo blocos de embasamento cristalino e zonas de cisalhamento regionais previamente mapeadas.

A escolha da área se justifica pela ocorrência de importantes lineamentos neoproterozoicos, como as zonas de cisalhamento de Portalegre e Paraú, que representam estruturas crustais de grande relevância para a evolução tectônica da Borborema. Assim, a localização do perfil permite integrar os resultados magnetotelúricos ao conhecimento geológico regional, oferecendo subsídios para interpretações sobre a compartimentação tectônica e a heterogeneidade crustal do Domínio Rio Grande do Norte.

Com parceria do INCT, juntamente com laboratório de geofísica da Universidade Federal do Ceará e a Universidade de Brasília, foram distribuídos 21 estações de coleta de dados em aproximadamente cinco municípios do Rio Grande do Norte.

A coleta de 12 dessas estações foram utilizadas no atual trabalho com o intuito de interpretar e modelar a faixa W-E de Itaú a Paraú.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivos Gerais

Elaborar e interpretar modelos de inversão tridimensional (3D) a partir de dados magnetotelúricos adquiridos ao longo do perfil Itaú-Paraú (RN), com vistas a caracterizar a estrutura elétrica da crosta no Domínio Rio Grande do Norte, integrando informações geológicas, estruturais e geofísicas, de modo a contribuir para a compreensão da evolução tectônica e magmática da Província Borborema.

1.3.2. Objetivos específicos

- Realizar uma revisão bibliográfica abrangente sobre a Província Borborema, com ênfase no Domínio Rio Grande do Norte, suas unidades litoestratigráficas, terrenos acrecionários e principais zonas de cisalhamento.
- Processar os dados magnetotelúricos adquiridos em campo, aplicando técnicas de remoção de ruídos e filtragens adequadas (ex.: *FIR-TSMP*), assegurando a qualidade e confiabilidade das séries temporais.
- Calcular os tensores de impedância e o tensor de fase, avaliando efeitos de dimensionalidade, distorção galvânica e heterogeneidades laterais, de modo a subsidiar a escolha e calibração dos modelos de inversão.
- Construir modelos de inversão 3D utilizando o código ModEM3D, comparando resultados obtidos com a inversão de impedância completa e com a inversão baseada no tensor de fase, visando maior robustez interpretativa.
- Identificar contrastes de resistividade associados a diferentes unidades crustais, destacando granitos brasilianos (ex.: Suíte Umarizal, Complexo Campo Grande), núcleos arqueanos/paleoproterozoicos (Complexo Caicó, Bloco Jaguaretama) e sequências neoproterozoicas (Grupo Seridó).
- Delimitar e interpretar as principais zonas de fraqueza crustal (Zonas de Cisalhamento de Paraú e de Portalegre, além de lineamentos NE-SW adjacentes), avaliando seu papel na compartimentação tectônica regional.
- Integrar os resultados magnetotelúricos com dados de aeromagnetometria e mapeamento geológico, a fim de propor um arcabouço geotectônico coerente para a região de Itaú-Paraú.
- Avaliar as implicações dos resultados para a evolução geodinâmica da Província

Borborema, considerando modelos de colisão e acreção de terrenos, magmatismo sincolisional e reativações neotectônicas.

- Discutir a aplicabilidade do método magnetotelúrico na investigação de estruturas profundas no Nordeste do Brasil, apontando limitações, potencialidades e perspectivas para estudos futuros.

2. Embasamento Teórico

2.1. Metodologia

A origem do método magnetotelúrico (MT) é comumente atribuída aos trabalhos pioneiros de Tikhonov (1950) e Cagniard (1953), segundo apontam diversos estudos acadêmicos e publicações científicas. No entanto, conforme destacado por Chave & Jones (2012), o avanço e o aperfeiçoamento da técnica foram impulsionados por uma série de pesquisas realizadas entre o final do século XIX e a primeira metade do século XX.

Um marco inicial importante foi estabelecido por Schuster (1889), que utilizou a técnica de separação de Gauss para calcular a variação diurna do campo magnético, contribuindo significativamente para as discussões sobre a indução eletromagnética terrestre.

A separação de Gauss é um procedimento matemático que visa facilitar a resolução de sistemas lineares por meio da transformação de uma matriz de coeficientes em forma escalonada, permitindo a aplicação de substituição reversa. No contexto do geomagnetismo, esse método é utilizado para decompor o campo magnético da Terra em componentes internas e externas, facilitando a análise das variações causadas, por exemplo, por correntes ionosféricas resultantes da interação com a radiação solar observadas por estações geofísicas, como o observatório Tatuoca (PA) e o centenário de Vassouras (RJ).

Com o uso de harmônicos esféricos aplicados à separação de Gauss, tornou-se possível identificar quais componentes do campo magnético têm origem no núcleo terrestre (internas) e quais se devem a fontes externas, como as correntes ionosféricas. Após essa separação, realiza-se a modelagem das variações diurnas para isolar os efeitos gerados por fontes externas de ruído.

Em 1930, Chapman & Price propuseram modelos de resistividade elétrica da Terra em função da profundidade, permitindo associar alterações nas propriedades resistivas à composição litológica, temperatura e pressão. Já Hirayama (1934), com a

teoria apoiada por Chave & Jones, 2012, discutiu o comportamento ortogonal entre os campos elétrico (E) e magnético (B), um princípio fundamental do método MT.

Rikitake (1951) avançou ao investigar a razão entre os campos E e B (E/B), considerando mudanças de fase e período (no domínio do tempo) associadas à resistividade em profundidade, assumindo um modelo unidimensional (1D). Posteriormente, Cagniard, L. (1953), Simpson & Bahr (2005) e Chave & Jones (2012), contribuiram ao propor o conceito de tensor eletromagnético, representando a relação entre os campos E e B como uma matriz que admite variação lateral de direção, em função de estruturas geológicas mais complexas, caracterizando um modelo bidimensional (2D).

Anteriormente, os modelos consideravam os vetores de E e B alinhados, simplificando as correlações entre eles. Desenvolveram um algoritmo capaz de lidar com essas variações, tornando possível a aplicação do método magnetotelúrico em cenários 2D.

Desde então, o método MT tem sido amplamente utilizado. Um exemplo expressivo foi o estudo de Stanley et al. (1977), que realizaram 16 sondagens MT em Yellowstone (EUA) para fins geológicos. A partir da década de 1980, iniciaram-se os esforços para o desenvolvimento da inversão tridimensional (3D), embora limitados pela capacidade computacional da época.

Durante esse período, começaram a ser empregados métodos numéricos, como os de elementos finitos e diferenças finitas, para resolver as equações de Maxwell em ambientes tridimensionais, possibilitando a simulação do comportamento eletromagnético da subsuperfície. Um marco importante foi o algoritmo desenvolvido por Mackie, Smith e Madden (1994), baseado em diferenças finitas e em gradientes conjugados não lineares, o qual permitiu o ajuste de modelos de resistividade a partir de dados reais em investigações magnetotelúricas. Esses avanços foram fundamentais para consolidar a modelagem e inversão 3D no MT, sendo continuamente aprimorados e aplicados em diferentes contextos geológicos, incluindo o Brasil, onde estudos recentes destacam o potencial do método para a caracterização de terrenos cristalinos e zonas de cisalhamento (Padilha et al., 2022).

Rodi & Mackie (2001) aperfeiçoaram esses algoritmos, tornando-os aptos a lidar com grandes volumes de dados e aplicando restrições que asseguram a plausibilidade geológica dos modelos gerados. Mais recentemente, Egbert & Kelbert (2012)

desenvolveram o código ModEM, também baseado em gradientes conjugados não lineares, com capacidade para processar grandes conjuntos de dados com alta resolução, integrando restrições geológicas e otimizando o desempenho computacional.

2.2 Princípios do Método Magnetotelúrico

O MT baseia-se na solução das equações de Maxwell aplicadas a um meio condutivo. As variações temporais do campo magnético induzem correntes elétricas no subsolo, que, por sua vez, geram campos elétricos secundários. A relação entre os componentes horizontais dos campos medidos na superfície é expressa pelo tensor de impedância (Z), que constitui o núcleo da interpretação MT.

De maneira simplificada:

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \end{bmatrix}$$

A partir desse tensor são calculadas a resistividade aparente e a fase, permitindo identificar heterogeneidades laterais e variações verticais da resistividade elétrica.

Quando os dados são afetados por distorção galvânica, um fenômeno comum em regiões cristalinas, utiliza-se o tensor de fase (Caldwell et al., 2004) como alternativa, uma vez que ele independe de efeitos estáticos e preserva a geometria das estruturas.

2.2.1. Fundamentos Físicos

As respostas magnetotelúricas derivam diretamente das equações de Maxwell no domínio da frequência (ω), que descrevem a dinâmica dos campos eletromagnéticos em meios materiais:

1. Lei de Gauss para o campo elétrico:

$$\nabla \cdot D = \rho e \quad (1)$$

2. Lei de Gauss para o campo magnético:

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

3. Lei de Faraday (indução eletromagnética):

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

4. Lei de Ampère-Maxwell:

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

Sendo as siglas:

B : Indução magnética

D : Deslocamento elétrico

E : Campo elétrico

H : campo magnético

J : Densidade de corrente

ρe : Densidade de carga

Abaixo estão representadas as equações auxiliares:

$$D = \epsilon E$$

$$B = \mu H$$

$J = \sigma E$ Sendo:

ϵ : Permissividade dielétrica

μ : Permeabilidade magnética

σ : Condutividade do meio

A condutividade (ou resistividade) controla a profundidade de investigação:

- altas frequências → profundidades rasas,
- baixas frequências → maiores profundidades.

Esse comportamento é descrito pela profundidade de pele (skin depth):

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}}$$

2.3. Fontes do Sinal Magnetotelúrico

As fontes naturais do MT são divididas conforme a frequência:

- Altas frequências (> 1 Hz): originam-se de descargas atmosféricas e propagam-se pela cavidade Terra–ionosfera.
- Baixas frequências (< 1 Hz): resultam em interações entre o vento solar e a magnetosfera/ionosfera, dominando investigações crustais profundas.

Isso torna o MT um método de ampla faixa de frequência, capaz de investigar uma grande

coluna da litosfera com um único arranjo de instrumentos (Simpson & Bahr, 2005; Chave & Jones, 2012).

2.4.Aplicação no MT

Essas equações fundamentam a interpretação dos sinais naturais captados na superfície da Terra. A análise das variações nos campos E e B permite inferir as propriedades elétricas da subsuperfície, como a resistividade elétrica em diferentes profundidades, por meio da inversão dos dados coletados.

Figura 3: Sistemas MT, suas fontes de sinais e período de aquição.

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	Artifical	De 10^{-4} s a 8s

Fonte: Modificado de Chaves e Jones (2012).

Nas medições magnetotelúricas baseadas em sinais naturais, os principais sistemas empregados incluem o de longo período (LMT), banda larga (BBMT), áudio-frequência (AMT) e radiofrequência (RMT). Quando a fonte do sinal é artificial, utiliza-se o sistema conhecido como magnetotelúrico de fonte controlada (CSAMT). Já quando as aquisições são realizadas em ambientes marinhos, a técnica recebe o nome de magnetotelúrica de fundo oceânico (*Seafloor* MT – SFMT).

No presente estudo foi utilizado um equipamento do tipo banda larga (BBMT), com capacidade de aquisição em um intervalo de tempo que vai de 10^{-3} a 10^3 segundos, abrangendo uma ampla faixa de frequências.

3. Materiais e Métodos

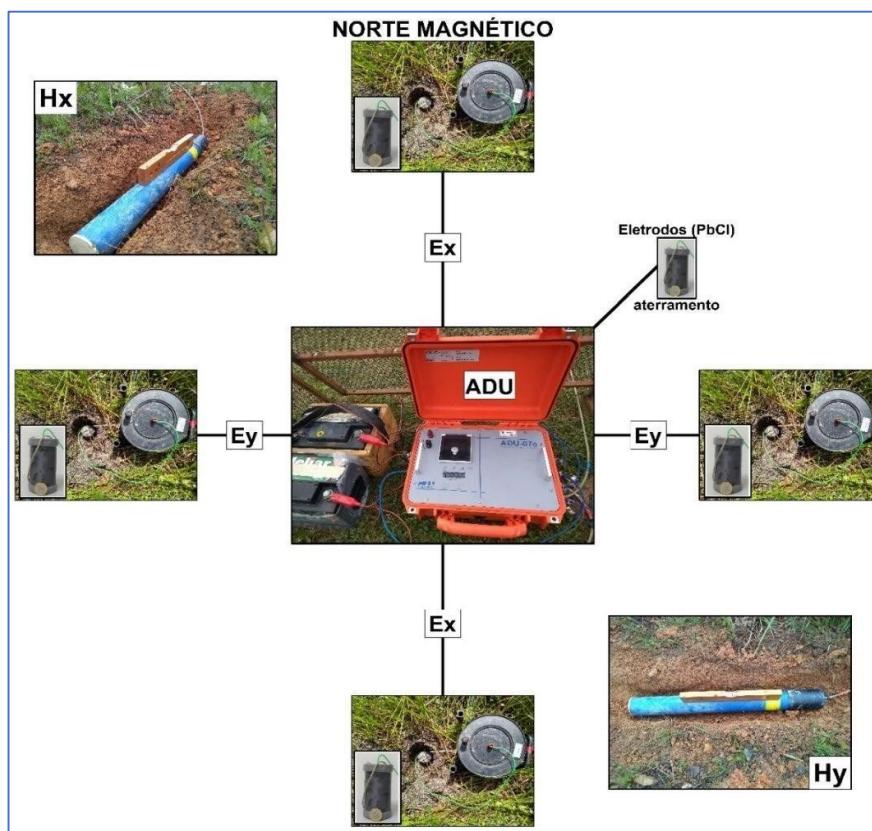
3.1 .Equipamentos e coleta

Para a realização deste trabalho foram utilizadas duas estações MT ADU07e pertencente ao Laboratório de Geofísica da Universidade Federal do Ceará, um GPS de mão para obter coordenadas Lat/Long e um veículo 4x4.

Este capítulo descreve a aquisição, processamento, inversão e integração dos dados magnetotelúricos utilizados neste estudo. O fluxo metodológico segue quatro etapas principais como aquisição dos dados em campo; Processamento e cálculo das impedâncias e tensor de fase; Inversão 3D dos dados utilizando o ModEM3D; Integração dos modelos geoelétricos com dados geológicos e aeromagnetométricos.

As unidades ADU07 (*by Metronix*) consiste de 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. O arranjo dos equipamentos em uma estação, conforme proposto por Simpson & Bahr (2005), como ilustrado na Figura 4.

Figura 4: Equipamentos utilizados na aquisição de dados MT em campo. O arranjo adotado acima foi aplicado para todas demais estações.



.Fonte: INCT.

De modo a exemplificar a instalação das estações MT, abaixo seguem os procedimentos de montagem em campo.

- Seleção de uma área com vegetação de baixo porte e uma área mínima de 50 m de

raio; os eletrodos de PbCl foram orientados a partir do norte magnético, colocados em contato com solo úmido e bentonita (em um furo de 20 cm) e interligados à central (a uma distância de 50 m) por meio de cabos elétricos;

- Nivelamento e orientação (com bússola) das duas bobinas de indução, uma na direção N-S (H_x) e outra na direção E-W (H_y), conectadas à central por cabos; em seguida, as baterias foram utilizadas para alimentar a central e realizados testes de contato dos eletrodos (com multímetro analógico).
- Inserção das frequências a serem adquiridas na central ADU, com os respectivos tempos de aquisição. As bandas de frequências utilizadas são subdivididas em HF (*High Frequency*) e LF (*Low Frequency*), cada uma subdividida em três bandas de frequências;

Os dados foram adquiridos em canais de frequência distintas, sendo eles de 128Hz, 512Hz, 4096Hz, 16KHz, 64KHz, 131KHz. Todas as frequência de aquisições foram processados no *software MAPROS*.

Ciente que no Brasil a frequência da rede elétrica é de 60 Hz, este ruído e seus harmônicos se preservam no dados das séries temporais obtidas, com isso, se faz necessário o uso de filtragem para eliminar estas perturbações.

Para filtrar utilizou-se o código *FIR TSMP*, que trabalha com a retirada de ruídos causado por interferências na rede brasileira, variando em um intervalo de múltiplos de 60Hz.

3.2. Processamento dos dados

Figura 5: Fluxograma representando o processamento dos dados adquiridos.



Fonte: A autora.

A imagem 5 apresenta o método de processamento dos dados. Os dados de cada estação são processados de maneira individual, porém para a elaboração do modelo final 3D foi necessário a utilização de maneira conjunta.

3.2.1. Aquisição dos dados

A instalação das estações MT em campo deve seguir critérios específicos para garantir a qualidade dos dados adquiridos. O local escolhido deve possuir vegetação baixa e uma área livre com, no mínimo, 50 metros de raio.

Uchoa, 2021, mostra o processo onde os eletrodos de PbCl devem ser posicionados de acordo com o norte magnético e inseridos em buracos de aproximadamente 20 cm de profundidade, preenchidos com solo umedecido e bentonita. Esses eletrodos são conectados à unidade central por cabos elétricos, respeitando uma distância de 50 metros entre eles

As bobinas de indução precisam ser corretamente niveladas e alinhadas com auxílio de uma bússola, sendo orientadas nos eixos N-S (Hx) e E-W (Hy) no referencial magnético. A conexão com a central é feita por meio de cabos elétricos. Após a montagem, as baterias são acionadas para alimentar o sistema, e a continuidade dos eletrodos é testada com um multímetro analógico para assegurar a adequada transmissão do sinal.

Em períodos de estiagem, recomenda-se umedecer os buracos 24 horas antes da instalação para melhorar a recepção do sinal pelos eletrodos. Após a finalização da montagem, configura-se a central ADU com as frequências a serem adquiridas e seus respectivos tempos de aquisição.

A imagem 6 apresenta a duração do processo de aquisição para cada frequência registrada em campo. Neste estudo, foram utilizadas frequências variando de 4 kHz a 128 Hz, sendo que a menor frequência foi processada até alcançar um intervalo de aproximadamente 8 segundos.

Figura 6: Relação frequência/tempo dos dados.

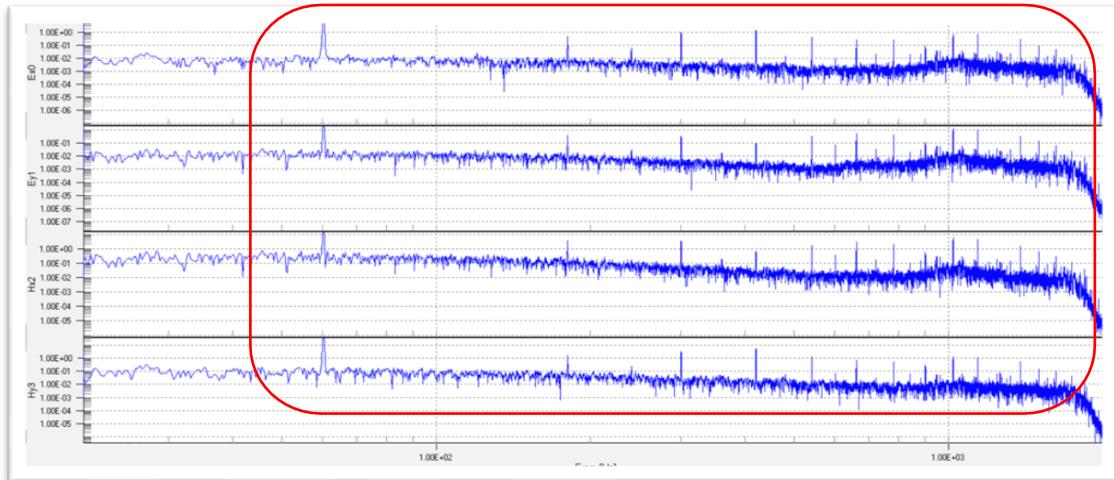
FREQUÊNCIA	TEMPO DE AQUISIÇÃO
4096 Hz	30 minutos
512 Hz	50 minutos
128 Hz	22 horas
32 Hz	Dizimado
4 Hz	Dizimado
0.125 Hz	Dizimado

Fonte: A autora.

3.2.2. Remoção dos ruídos

Para o inicio do processamento dos dados, é necessário fazer a remoção de ruídos gerados devido à interferência da redes elétricas próximas. A imagem 7 mostra como esses ruidos interferem totalmente na qualidade e confiabilidade do dados, fazendo com seja retirado tais ruídos.

Figura 7: Dados de frenquênciа de 4096Hz da estação 9 com ruídos.



Fonte: Elaboração própria pelo software MAPROS.

O código TSMP (*Time Series Manipulation Process*), foi utilizado para remoção dos ruídos juntamente com o software MAPROS que é utilizado para analisar as séries temporais e identificar em quais harmônicos ocorrem os ruídos provenientes da rede elétrica de 60 Hz. Esse código permite ao usuário realizar correções permanentes nos arquivos de aquisição das estações.

Destaca-se que as FFTs utilizadas para filtrar os dados foram de 16384+1 (lei de Nyquist) amostras por janela, em cada janela foram excluídos a frequencia central de

60Hz (rede elétrica) e os harmônicos impares (180, 300, 420, 540 Hz...).

Figura 8: Código TSMP sendo aplicado para remover os ruídos identificados na imagem 7.

```

Hy_4096_262.bat - Bloco de Notas
Arquivo Editar Formatar Exibir Ajuda
tsmp -firfil 16385 61 59 0 -overwrite 263_V01_C03_R000_THy_BL_4096H.ats
tsmp -firfil 16385 181 179 0 -overwrite 263_V01_C03_R000_THy_BL_4096H.ats
tsmp -firfil 16385 301 299 0 -overwrite 263_V01_C03_R000_THy_BL_4096H.ats
tsmp -firfil 16385 421 419 0 -overwrite 263_V01_C03_R000_THy_BL_4096H.ats
tsmp -firfil 16385 541 539 0 -overwrite 263_V01_C03_R000_THy_BL_4096H.ats
tsmp -firfil 16385 661 659 0 -overwrite 263_V01_C03_R000_THy_BL_4096H.ats
tsmp -firfil 16385 721 719 0 -overwrite 263_V01_C03_R000_THy_BL_4096H.ats
tsmp -firfil 16385 781 779 0 -overwrite 263_V01_C03_R000_THy_BL_4096H.ats
tsmp -firfil 16385 841 839 0 -overwrite 263_V01_C03_R000_THy_BL_4096H.ats
tsmp -firfil 16385 901 899 0 -overwrite 263_V01_C03_R000_THy_BL_4096H.ats
tsmp -firfil 16385 961 959 0 -overwrite 263_V01_C03_R000_THy_BL_4096H.ats
tsmp -firfil 16385 1021 1019 0 -overwrite 263_V01_C03_R000_THy_BL_4096H.ats
tsmp -firfil 16385 1141 1139 0 -overwrite 263_V01_C03_R000_THy_BL_4096H.ats
tsmp -firfil 16385 1201 1199 0 -overwrite 263_V01_C03_R000_THy_BL_4096H.ats
tsmp -firfil 16385 1261 1259 0 -overwrite 263_V01_C03_R000_THy_BL_4096H.ats
tsmp -firfil 16385 1321 1319 0 -overwrite 263_V01_C03_R000_THy_BL_4096H.ats
tsmp -firfil 16385 1381 1379 0 -overwrite 263_V01_C03_R000_THy_BL_4096H.ats
tsmp -firfil 16385 1441 1439 0 -overwrite 263_V01_C03_R000_THy_BL_4096H.ats
tsmp -firfil 16385 1501 1499 0 -overwrite 263_V01_C03_R000_THy_BL_4096H.ats
tsmp -firfil 16385 1621 1619 0 -overwrite 263_V01_C03_R000_THy_BL_4096H.ats
tsmp -firfil 16385 1741 1739 0 -overwrite 263_V01_C03_R000_THy_BL_4096H.ats
tsmp -firfil 16385 1861 1859 0 -overwrite 263_V01_C03_R000_THy_BL_4096H.ats

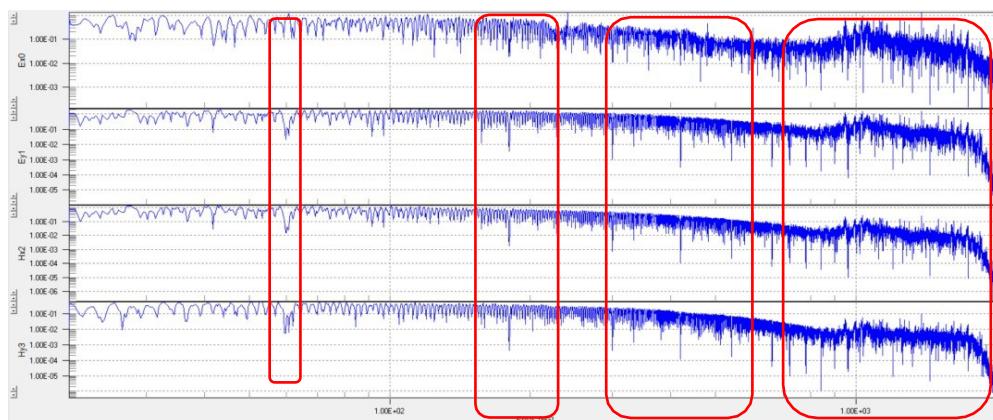
```

Fonte: INCT.

Após a correção dos ruídos apresentados na imagem 7, provenientes da frequência de 60 Hz da rede elétrica brasileira e de seus harmônicos pares e ímpares, a série temporal foi analisada e identificada com o auxílio do *software* Mapros.

O código TSMP utiliza o filtro *FIR* e é ajustado manualmente para cada um dos canais Ex, Ey, Hx e Hy em todas as estações e nas respectivas frequências de aquisição. Esse procedimento tem como finalidade remover de forma precisa os sinais indesejados presentes nas séries temporais, conforme descrito por Borah et al. (2015).

Figura 9: Dados de frequência de 4096 da estação 9 após retirada dos picos de ruídos.

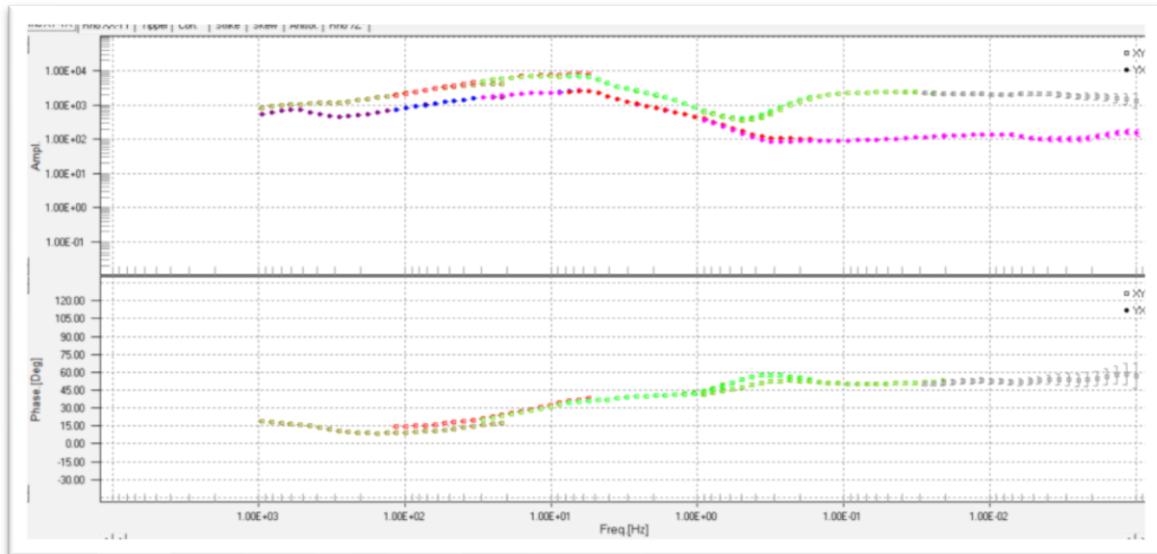


Fonte: Elaboração própria pelo *software* MAPROS.

Com isso foi possível filtrar os ruídos associados à frequência de 60 Hz correspondente à rede elétrica no Brasil assim como seus harmônicos pares e ímpares. Esses ruídos, destacados na imagem 9 por círculos vermelhos, foram identificados nos espectros de potências por meio da análise realizada no *software Mapros*.

3.2.3. Tensor de Impedância

Figura 10: Curva de resistividade e fase da frequência de 4096Hz coletados pela estação 9.



Fonte: Elaboração própria pelo *software MAPROS*.

Assim que os ruídos são eliminados como descrito no tópico anterior, dá-se início à segunda fase do processamento, que envolve a conversão dos arquivos de séries temporais (no domínio do tempo) em tensores de impedância, agora no domínio da frequência. Como resultado, obtém-se valores de resistividade aparente e fase.

A formação do tensor de impedância ocorre por meio da correlação entre os componentes horizontais do campo elétrico (E_x e E_y) e os componentes do campo magnético (H_x e H_y), organizados perpendicularmente entre si em um ponto específico e para uma frequência determinada.

Esse procedimento foi executado utilizando o software MAPROS, no qual foram empregados diversos parâmetros, como parzen de 0.8 e processamento por *selected stack* e *window length*. O processamento foi realizado em todas as estações, abrangendo as frequências de 128 Hz, 512 Hz, 4 KHz, além da dizimação da frequência de 128 Hz.

4. Configuração Geológica

A área de estudo localiza-se no centro-oeste do estado do Rio Grande do Norte, inserida na Província Borborema, uma extensa província geotectônica do Nordeste brasileiro caracterizada por um mosaico de terrenos acrecionados durante a Orogenia Brasiliana/Pan-Africana (ca. 650–540 Ma).

Esta província é tradicionalmente subdividida em três grandes domínios tectonoestratigráficos: Setentrional, Central e Meridional (Almeida et al., 1981; Santos & Medeiros, 1999). A linha Itaú-Paraú situa-se no Domínio Rio Grande do Norte (DRN), parte integrante do Domínio Setentrional, marcado pela presença de núcleos arqueanos/paleoproterozoicos, cinturões neoproterozoicos metamorfizados, intrusões graníticas brasileiras e inúmeras zonas de cisalhamento crustais.

O DRN apresenta um embasamento complexo, composto por terrenos arqueanos e paleoproterozoicos retrabalhados durante o Ciclo Brasiliano, recortados por intrusões graníticas e limitados por zonas de cisalhamento dúcteis e rúptil-dúcteis de direção preferencial NE-SW e E-W.

Entre as estruturas mais expressivas está a Zona de Cisalhamento de Paraú (ZC Paraú), que atravessa a área estudada e representa um importante lineamento crustal associado ao regime transpressivo brasileiro (Angelim et al., 2006). Essas zonas de cisalhamento constituem importantes zonas de fraqueza da crosta, sendo alvos potenciais de anomalias condutivas no método magnetotelúrico.

4.1 Unidades Geológicas Interceptadas pela Linha Itaú–Paraú

Ao longo do perfil MT, são interceptadas unidades que registram a evolução crustal do DRN, desde terrenos arqueanos até rochas neoproterozoicas deformadas.

4.1.1 Núcleos Arqueanos e Paleoproterozoicos

- O Complexo Caicó (Arqueano a Paleoproterozoico, >2,5 Ga) é composto por ortognaisses tonalíticos, trondjemíticos e granodioríticos (TTG), além de metassedimentos de fácies anfibolito a granulito, constituindo o embasamento mais antigo da região (Jardim de Sá, 1994; Angelim et al., 2006).
- O Complexo ou Núcleo Campo Grande representa uma das principais exposições do embasamento antigo do Domínio Rio Grande do Norte. É composto predominantemente por gnaisses migmatíticos, metagabros e anfibolitos, tonalitos e

granodioritos (litotipos TTG), lentes supracrustais parcialmente assimiladas. As rochas apresentam forte bandamento gnáissico e evidências de migmatização intensiva, indicando múltiplos eventos metamórficos em fácies anfibolito a granulito. Intrusões graníticas neoproterozoicas cortam parte desse embasamento (Galindo, 1993; Trindade et al., 1999).

- O Complexo Jucurutu é formado por paragnaisses, quartzitos e mármore, interpretados como sequências supracrustais paleoproterozoicas. Suas litologias são variáveis, mas geralmente mais condutivas que os ortognaisses TTG.
- O Bloco Jaguaretama, também denominado Complexo Jaguaretama, é um dos principais terrenos paleoproterozoicos do Domínio Setentrional da Província Borborema. Localiza-se no Estado do Ceará, mas sua influência estrutural e crustal se estende para o setor oeste da área estudada no Rio Grande do Norte. Estudos geocronológicos demonstram que se trata de um terreno alóctone, acrescido à Província Borborema durante a Orogenia Brasiliana, apresentando assinatura isotópica distinta dos terrenos adjacentes (Fetter, 1999; Sá et al., 2014).

Sua composição inclui predominantemente ortognaisses tonalíticos a granodioríticos, migmatitos e rochas graníticas retrabalhadas (Angelim et al., 2006; Fuck, Jardim de Sá & Dias, 2008). O metamorfismo de alto grau registrado nas rochas do bloco indica ciclos sucessivos de retrabalhamento crustal desde o Paleoproterozoico, com forte reativação neoproterozoica (Brito Neves, Santos & Van Schmus, 2000).

Do ponto de vista tectônico, o Bloco Jaguaretama é interpretado como parte do antigo Terreno Jaguaribeano, o qual colidiu com o Terreno Rio Piranhas–Seridó durante eventos de convergência neoproterozoica (Caxito, Santos & Dantas, 2016). Essa colisão está relacionada à formação de zonas de cisalhamento e limites tectônicos expressivos que segmentam o Domínio Setentrional.

4.1.2. Sequências Neoproterozoicas (Ciclo Brasiliano)

- O Grupo Seridó (ca. 650–600 Ma) representa metavulcanossedimentos depositados em bacias neoproterozoicas associadas à Orogenia Brasiliana, formado por micaxistas, quartzitos e formações ferríferas (Brito Neves, 1984; Van Schmus et al., 2008).
- Coberturas vulcânicas-sedimentares associadas a cinturões móveis: metavulcânicas

e metassedimentares deformadas e metamorfisadas em condições de fácies anfibolito.

4.1.3. Intrusões Graníticas Brasilianas

Diversos corpos graníticos intrudem os terrenos supracitados. O mais expressivo na faixa é o Granito Umarizal, de composição predominantemente monzogranítica a sienogranítica, datado em torno de 560–580 Ma. Sua assinatura resistiva é marcante em estudos magnetotelúricos, em contraste com as zonas mais condutivas associadas a faixas de cisalhamento e metassedimentos.

4.1.4. Zonas de Cisalhamento

- Zona de Cisalhamento de Paraú (ZC Paraú): estrutura de direção aproximadamente E–W, de caráter transpressivo, que representa uma das feições tectônicas mais importantes da Província Borborema. No contexto geofísico, espera-se que tal zona apresente condutividade relativamente mais elevada devido à presença de grafita, fluidos ou enriquecimento em minerais condutivos ao longo de planos miloníticos.
- A Zona de Cisalhamento Portalegre (ZCPa) constitui uma das estruturas mais expressivas do Domínio Setentrional da Província Borborema. Trata-se de uma zona de cisalhamento dúctil a dúctil-rúptil de direção preferencial NNE-SSW, que marca o limite tectônico entre o Terreno Jaguaribeano (Complexo Jaguaretama) e o Terreno Rio Piranhas-Seridó (Complexo Caicó). Estudos estruturais e isotópicos demonstram que, embora ambos os terrenos apresentem idades paleoproterozoicas (~2,2 Ga), suas assinaturas isotópicas (U-Pb em zircão e Sm-Nd) são distintas, evidenciando a natureza alóctone do Complexo Jaguaretama (SÁ et al., 2014).

A ZCPa foi intensamente reativada durante a Orogenia Brasiliiana (ca. 650–540 Ma), em regime transpressivo, com evidências de deslocamento lateral sinistral estimado em até 30–35 km (Nóbrega, 2004; Ferreira, 2019). Além disso, trabalhos geomorfológicos apontam reativações neotectônicas no Cenozoico, que condicionaram o soerguimento relativo dos maciços de Portalegre e Martins, controlando a inversão do relevo e a dissecação dos platôs regionais (Maia et al., 2016). No contexto geofísico, a ZCPa representa um alvo de particular interesse para estudos magnetotelúricos, dado que

zonas de cisalhamento profundas frequentemente apresentam maior condutividade elétrica em função da presença de fluidos, grafita e minerais condutivos em planos miloníticos (Sá et al., 2014; Maia et al., 2016). Assim, sua integração aos modelos geológicos e geofísicos regionais é essencial para a correta interpretação da resistividade elétrica da crosta na linha Itaú-Paraú.

- Lineamentos NE-SW adjacentes: lineamentos de menor porte que segmentam a região e controlam a colocação de corpos graníticos.

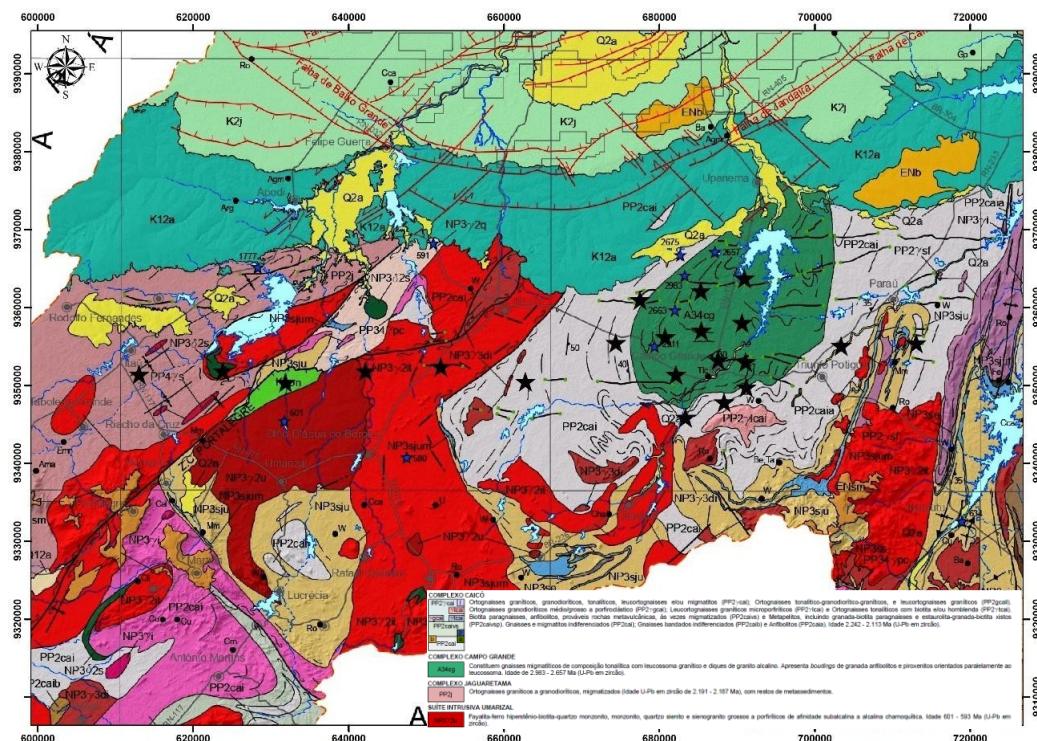
4.2. Relevância para o Método Magnetotelúrico (MT)

- Contrastes elétricos esperados: suturas neoproterozoicas, se existentes na faixa de estudo, podem apresentar condutividade contrastante, consolidando-se como alvos potenciais no MT.

- Modelagem geológica combinada com geofísica: a integração de dados estruturais (faixas, zonas de cisalhamento) com informação geofísica regional (gravidade, geoide, magnetismo) fornece base sólida para calibrar inversões MT e reforçar interpretações de resistividade.

- A interpretação das anomalias MT foi realizada em conjunto com dados estruturais, aeromagnetometria e mapas geológicos do CPRM, permitindo maior confiabilidade na correlação entre resistividade e unidades crustais

Figura 11: Mapa Geológico com estacoes MT de Itaú a Paraú.



5. Resultados Preliminares

Neste capítulo são apresentados os principais resultados preliminares obtidos a partir da inversão 3D dos dados magnetotelúricos adquiridos ao longo da linha Itaú–Paraú (RN). Os modelos de resistividade 3D foram analisados em diferentes cortes e perspectivas, com o objetivo de identificar contrastes geoelétricos compatíveis com as unidades geológicas descritas anteriormente.

- **Construção do modelo de inversão 3D**

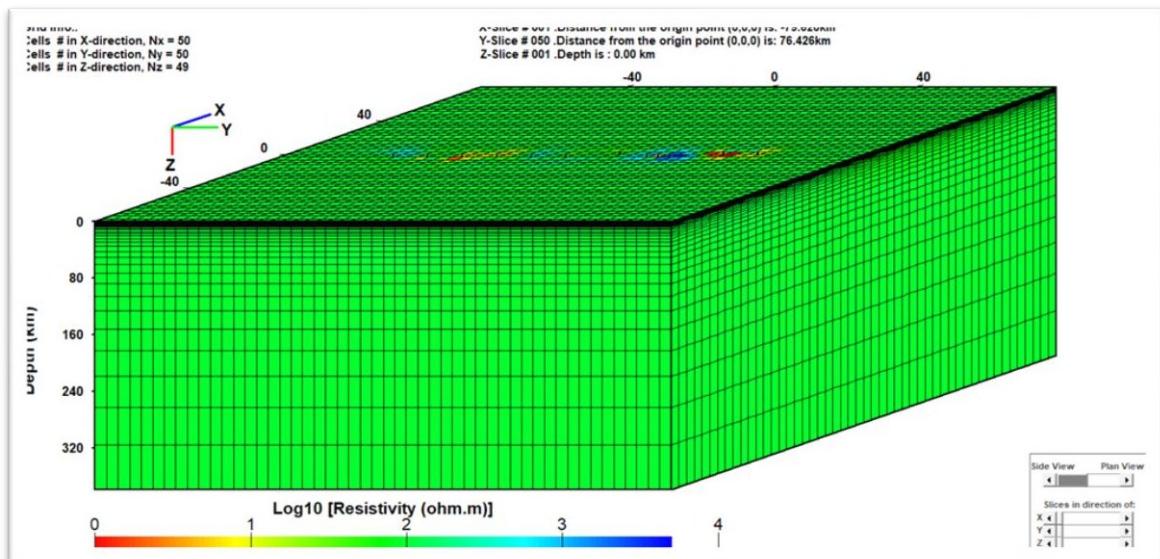
Nesse trabalho foram utilizadas um total de 12 estações em uma *transect Leste-Oeste* recortando as cidades de Paraú (Leste) até Itaú (Oeste) compreendendo um total de 100km.

Em todas as estações foram calculadas impedâncias cujos períodos foram de 10^{-3} até 10^3 s, sendo 10km de espaçamento entre as estações de 1 a 7 e 20 e 21 e espaçamento de 5km entre as estações 8, 9 e 10.

Como neste trabalho optou-se por uma inversão 3D, não foi necessário realizar o cálculo de análise de dimensionalidade dos dados obtidos, em função do código considerar todas as componentes Zxy, Zyx, Zxx, Zyy durante a modelagem. Tal cálculo apenas seria útil se o modelo de inversão fosse do tipo 2D.

Para o modelo inicial utilizou-se o *software* 3D GRIDacademic cedido pelo seu desenvolvedor **Naser Meqbel** o qual se utiliza de um cubo, sendo neste trabalho com 50 células na componente horizontal X, 50 células na componente horizontal Y e 49 células na componente Z (50x50x49), como mostra a imagem 12.

Figura 12: Modelo 3D contendo os grids de espaçamento nas direções Norte e Sul e profundidade.



Fonte: Elaboração própria pelo *software* 3D GRIDacademic.

O modelo inicial foi composto de espaçamento homogêneo entre as células e resistividade de 100ohm.m, como pode ser observado na imagem 12 sendo cada célula com valor igual de 3 km na direção em X e 3 km na direção em Y, com profundidade inicial de 20 m e um fator *increasing* de 1.2.

- **Modelo de inversão 3D**

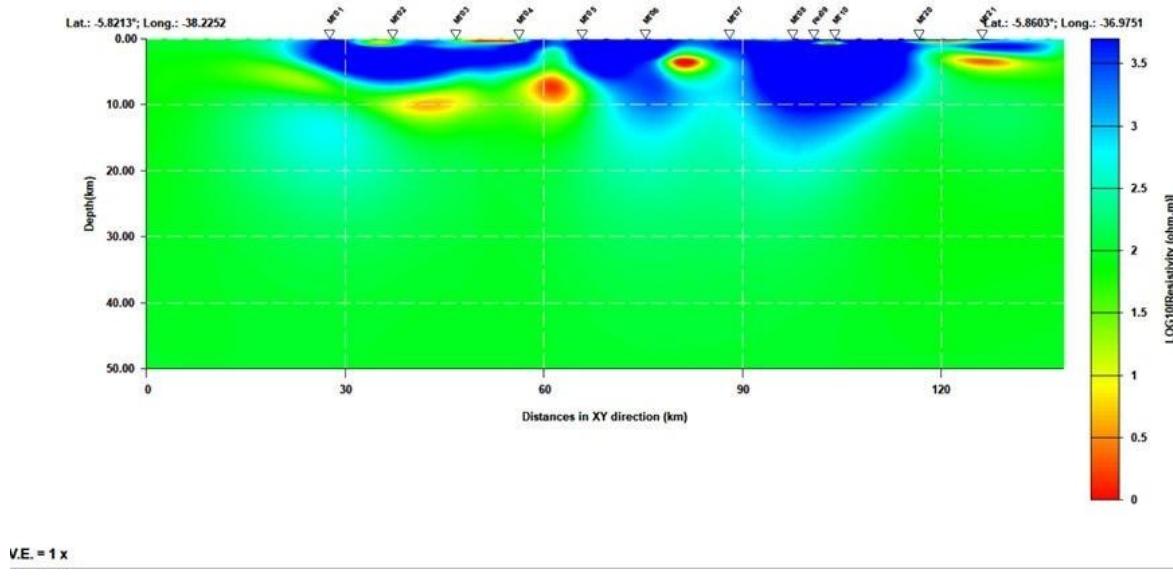
O modelo de inversão 3D foi obtido a partir do código ModEM3D (Egbert & Kelbert 2012), instalado no supercomputador pertencente a Universidade de Lisboa-Portugal (ULisboa). No dado incial foram utilizadas as seguintes componentes: Zxy, Zyx, Zxx e Zyy de impedâncias cujas unidades estão em mV/km/nT.

Os parametros de inversão foram de 5% de erro *Floor* em todas as componentes mencionadas acima, obtendo cerca de 100 interações e rms de 7 somando um total de 4 dias de processamento, obtendo um rms de 4.12.

- **Confecção do Modelo 3D**

Utilizando o 3DGRIDacademic através da função 2D *view* é possível realizar perfis em diferentes perspectivas. Abaixo, a imagem 13 mostra um *slice* sob as estações dispostas em campo.

Figura 13: Perfil de resistividade sob as estações E-W.



Fonte: Elaboração própria pelo software 3D GRIDacademic.

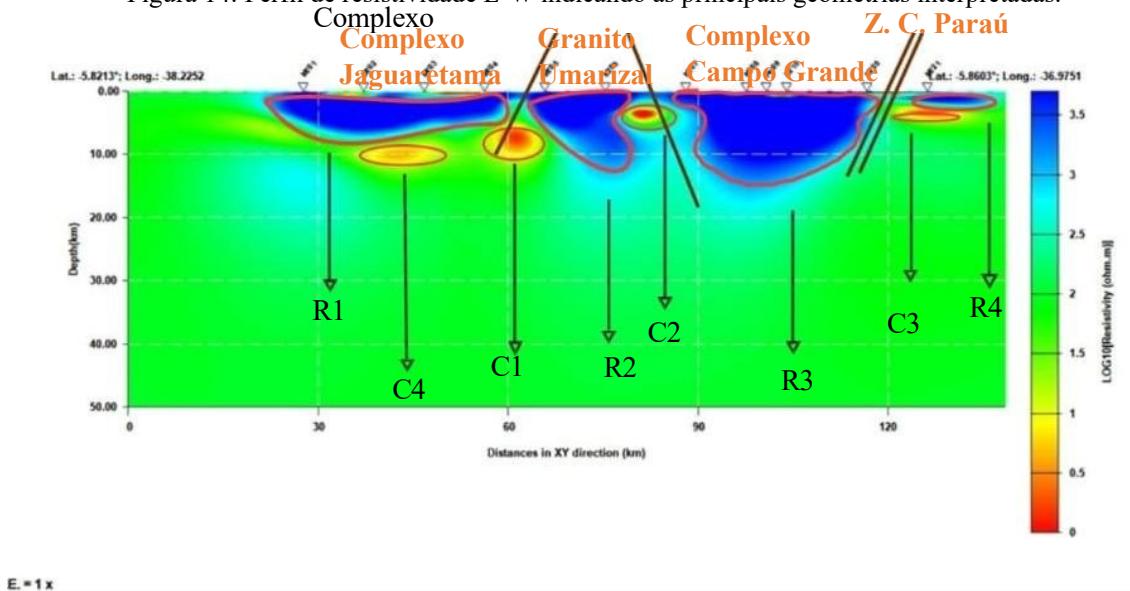
A figura acima mostra o resultado de inversão 3D contemplando os municípios de Itaú até Paraú – RN, o modelo contém contrastes de valores que variam de 1 até 5000 ohm.m

6. Interpretação dos Modelos Geoeletétricos e Integração Geofísica

A partir dos resultados obtidos, é possível interpretar as principais estruturas e geometrias geológicas de subsuperfície presentes nos modelos geoeletétricos magnetotelúricos (MT).

Os modelos de inversão 3D revelam contrastes marcantes de resistividade, permitindo identificar corpos resistivos e condutivos associados às unidades litológicas e às estruturas crustais conhecidas entre Itaú e Paraú.

Figura 14: Perfil de resistividade E-W indicando as principais geometrias interpretadas.



Fonte: Elaboração própria pelo software 3D GRIDacademic.

Com base na Figura 14, identificam-se quatro corpos resistivos (R1, R2, R3 e R4) e quatro corpos condutivos (C1, C2, C3 e C4), determinados a partir dos contrastes geoeletétricos observados no modelo de inversão.

A feição R1, com espessura aproximada entre 5 e 8 km, apresenta alta resistividade compatível com litologias ortognáissicas granodioríticas a graníticas. Essa resposta é coerente com o Complexo Jaguaretama, composto por ortognaisses paleoproterozoicos e migmatitos.

De modo semelhante, R2 apresenta uma assinatura resistiva elevada atribuída à Suíte Granítica Umarizal, caracterizada por granitos leuco a mesocráticos de idade neoproterozoica. Ambas as unidades são separadas pela Zona de Cisalhamento Portalegre, embora essa zona não tenha sido discretizada no modelo de inversão 3D com impedâncias completas, possivelmente devido ao efeito de distorções galvânicas.

As feições resistivas R1 e R2 recobrem unidades condutoras C4 e C1, com profundidades que alcançam aproximadamente 10 km. Essas respostas podem ser interpretadas como litologias neoproterozoicas relacionadas à Suíte Intrusiva Itaporanga, formada por monzogranitos e sienogranitos porfiríticos, cujos termos mais deformados tendem a apresentar condutividade mais elevada.

Avançando ao longo do perfil, observam-se duas feições marcantes: C2 (condutora) e R3 (resistiva). Em C2, profundidades próximas de 5 km e resistividades próximas a $1 \Omega \cdot m$ sugerem a presença de rochas máficas, fluidos ou zonas de alteração hidrotermal, coerentes com interpretações feitas com base na CPRM (2021).

Em contato direto com C2 encontra-se R3, um corpo altamente resistivo que se estende até ~ 20 km de profundidade. Essa resposta é coerente com o Complexo Campo Grande, caracterizado por gnaisses migmatíticos tonalíticos de idade arqueana a paleoproterozoica.

Por fim, as feições C3 e R4 apresentam comportamento semelhante ao observado para C4 e R1, evidenciando a presença de suítes intrusivas neoproterozoicas com baixa resistividade, sobrepostas por depósitos aluvionares e eólicos de resistividade intermediária. A influência da Zona de Cisalhamento Paraú é observada no controle estrutural dessas unidades.

- **Interpretação do modelo MT gerados a partir dos dados preliminares**

Os modelos de inversão 3D revelam contrastes importantes de resistividade elétrica ao longo da linha Itaú–Paraú, permitindo mapear feições crustais profundas no Domínio Rio Grande do Norte. Corpos altamente resistivos são interpretados como fragmentos de embasamento arqueano/paleoproterozoico, compatíveis com o Bloco Jaguaretama e o Complexo Campo Grande (Ferreira et al., 2023; Santos et al., 2023).

Na porção oeste do perfil, observa-se o Bloco Jaguaretama, composto por ortognaisses tonalítico-granodioríticos, migmatitos e granitos metamorfizados. Este bloco é limitado por zonas de cisalhamento neoproterozoicas, como a Zona de Cisalhamento Portalegre, que condicionou sua compartimentação estrutural durante a Orogenia Brasiliiana. Suas assinaturas isotópicas confirmam retrabalhamento de crosta antiga.

Seguindo para leste, encontra-se a Suíte Granítica Umarizal, formada por granitos cálcio-alcalinos sin- a tardi-orogênicos do Ciclo Brasiliano (~ 580 – 600 Ma). No

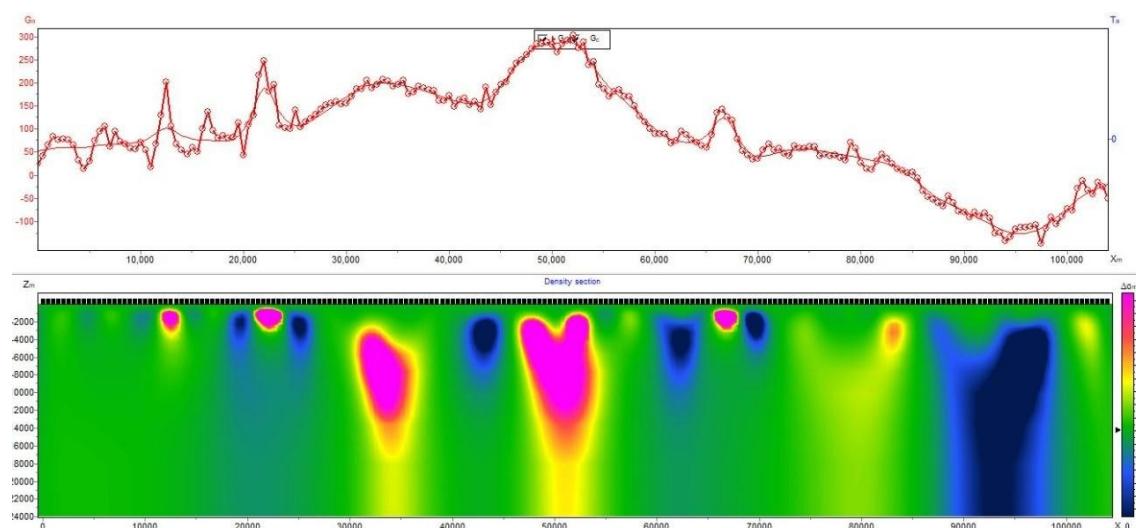
método MT, essa suíte tende a apresentar resistividade elevada, embora zonas cisalhadas produzam faixas condutivas intrínsecas a sua evolução tectônica. Em subsuperfície, podem ocorrer fluidos derivados da migmatização de xistos e metassedimentos cálcio-alcalinos, justificando condutores associados.

Na faixa central, correspondente à área verde da Figura 11 (CPRM, 2021), destaca-se o Complexo Campo Grande, onde resistividades superiores a $3.500 \Omega\cdot m$ refletem a presença de gnaisses tonalíticos e granodioríticos de alto grau. Em contraste, zonas de cisalhamento exibem valores tão baixos quanto $10 \Omega\cdot m$. O método MT é particularmente eficiente para delimitar esses contrastes.

As estações MT destacadas foram posicionadas de forma estratégica, pois cobrem três contextos geológicos cruciais: Os granitos brasilianos (resistivos, mas estruturados), o embasamento peleoproterozoico (resistivos, porém retrabalhado) e as Zonas de cisalhamento (condutivas, mineralizadas e de importância tectônica para o terreno).

- **Integração de modelo MT com aéromagnético**

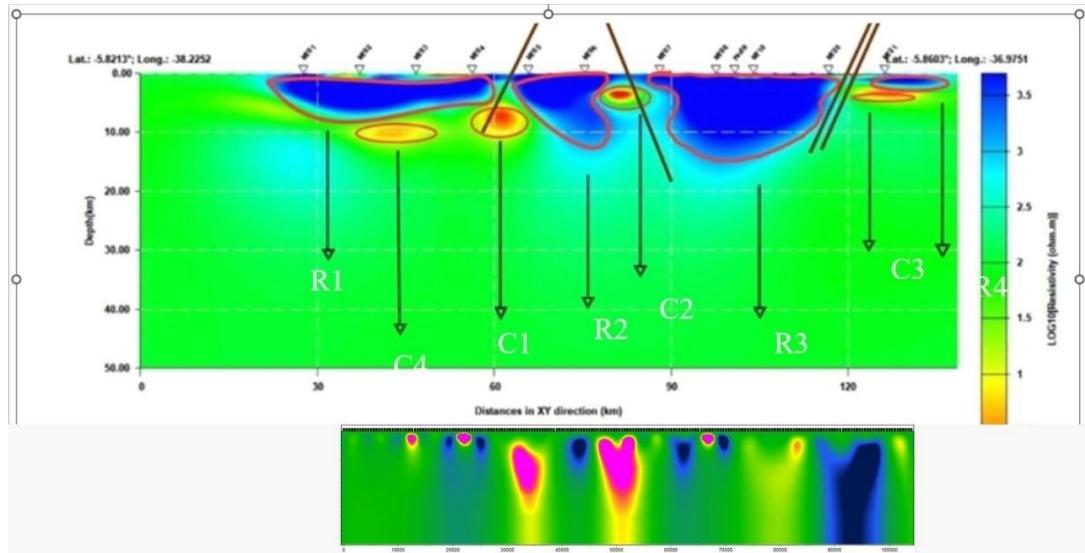
Figura 15: Modelo de inversão 2D magnetométrico entre Itaú-Paraú.



Fonte: A autora. 2025.

O painel superior evidencia oscilações da intensidade magnética ao longo do perfil, refletindo contrastes de magnetização entre litologias distintas. Valores elevados correspondem a rochas ricas em minerais magnéticos (granitos com magnetita, diques máficos). Valores baixos a negativos indicam zonas de cisalhamento ou rochas pobres em magnetita.

Figura 16: Integração do modelo de inversão 3D MT com o modelo de inversão aéromagnético 2D de Itaú a Paraú.



Fonte: A autora. 2025.

As oscilações refletem contraste de magnetização entre diferentes litologias e estruturas. Os valores mais altos significam presença de rochas ricas em minerais magnéticos por exemplo os granitos, diques ou gnaisses com magnetita e ja os valores mais baixos e ou negativos são rochas pobres em magnetita ou zonas de alteração.

No painel inferior (mapa colorido – Figura 16), dentro da escala de cores, as cores rosa/magenta/vermelho mostram uma alta susceptibilidade magnética, entre 20-25km, 45-55km, provavelmente associadas a Suite Granitica Umarizal e/ou corpos máficos associados ao Brasiliano. Em método MT eles aparecem como resistivos, mas com condutividade aumentada de houver cisalhamento.

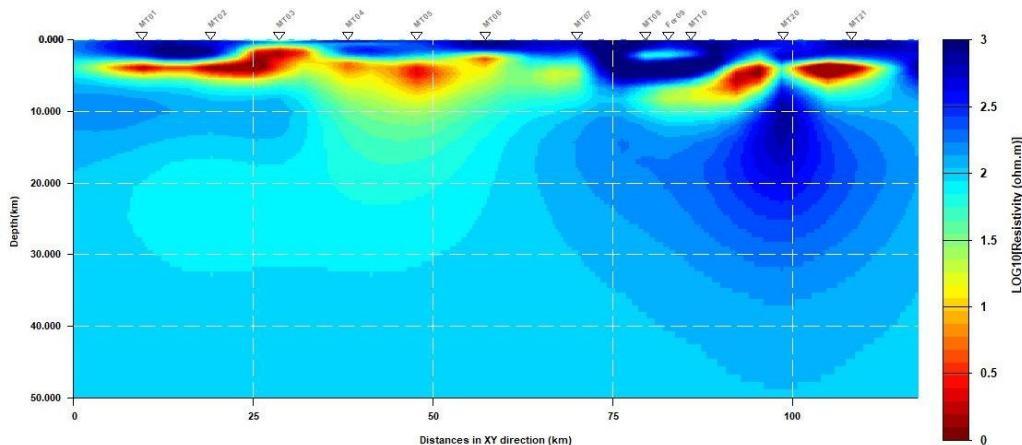
Em verde ou níveis intermediários, pode corresponder ao Complexo Caicó de gnaisses tonalíticos-granodioríticos paleoproterozoicos. Esse embasamento tem magnetização média ou nao forma constastes. No MT tende a ser resistivo, exceto em zonas de cisalhamento condutivo.

Nas anomalias de baixa magnetização ou azul e azul escuro estão associadas a zonas de cisalhamento (Zona de Cisalhamento Porto Alegre e Zona de Cisalhamento Paraú), fazendo com que no método MT essas zonas devem coincidir com condutores crustais.

- **Modelo de inversão por Tensor de Fase**

Nos dias finais da escrita deste trabalho foi realizado um modelo de inversão 3D utilizando somente o Tensor de Fase (*phase tensor* – Caldwell, 2004), que permite a obtenção de valores de estruturas geoelétricas sem a perturbação galvânica no ambiente geológico.

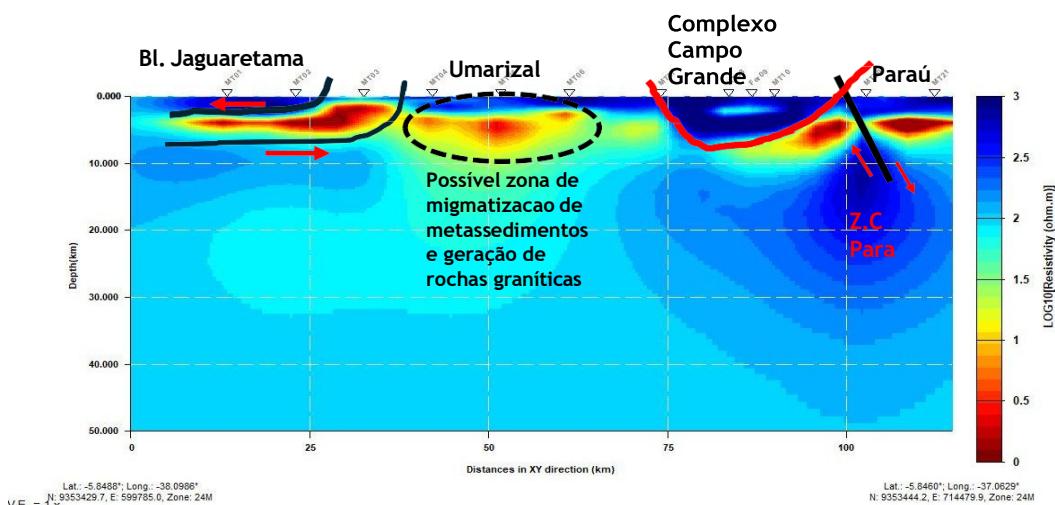
Figura 17: Modelo de inversão 3D a partir do Tensor de fase.



Fonte: A autora. 2025.

A figura 17 mostra o modelo de inversão 3D em forma de contraste de resistividade geoelétrica entre os municípios de Itaú a Paraú. Nota-se que neste modelo quando comparado com o modelo de *full impedancia* (Figura 12), a geometria e os contrastes de resistividades possuem valores distintos.

Figura 18: Modelo de inversão 3D do Tensor de fase com as principais estruturas geológicas presentes na área de estudo.



Fonte: A autora. 2025.

A figura 18 mostra as principais feições geológicas presentes na área de estudo interpretadas a partir do modelo de inversão do tensor de fases, cujo valores de resistividades variam de 1 ohm.m até 1000 ohm.m.

Ao comparar o modelo de inversão utilizando todas as impedâncias com o tensor de fase percebe-se que a Zona de Cisalhamento Portalegre é realçada e os demais compartimentos geológicos são presentes em ambos os modelos (Jaquaretama, Umarizal, Complexo Campo Grande e Zona de Cisalhamento Paraú). O RMS foi de 3.35.

Destaca-se no modelo de inversão do tensor de fases que a Z. C. Portalegre se apresenta de forma horizontal abaixo do bloco Jaquaretama e se verticaliza entre os limites do Jaguaretama com a suíte granítica Umarizal.

O condutor abaixo da suíte granítica Umarizal pode representar zonas de migmitização os quais podem gerar fluidos graníticos de composição cálcio-alcalinos a exemplo do que ocorre nesta suíte. Esta suíte apresenta um contato abrupto de contraste de resistividade com o complexo do Campo Grande.

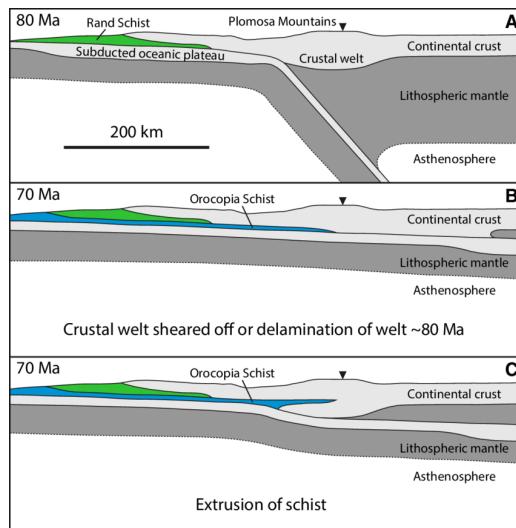
O núcleo arqueano do Complexo Campo Grande se apresenta com valores de resistividades superiores a 1000 ohm.m com morfologia típica de “domo”, com maior espessura para a porção oeste e um leve afinamento para a porção leste até a Z. C. Paraú.

A Z. C. Paraú se apresenta com contrastes mais significativos quando comparados com o modelo de inversão *full* impedância, os dois condutores nesta zona possuem geometrias típicas de falhas normais e a partir de 10 a 50 km um corpo resistor é identificado no modelo de inversão, sugerindo uma grande descontinuidade nesta porção.

De acordo com a teoria, a geometria crustal inferida a partir dos modelos magnetotelúricos ao longo do perfil Itaú–Paraú sugere um regime colisional caracterizado por estruturas de baixo ângulo, particularmente na porção de Itaú e na Zona de Cisalhamento Portalegre.

Essa configuração é compatível com modelos tectônicos do tipo *detachment*, nos quais ocorre duplicação da crosta continental por cavalgamentos de baixo mergulho, conforme ilustrado nos esquemas A, B e C da Figura 19.

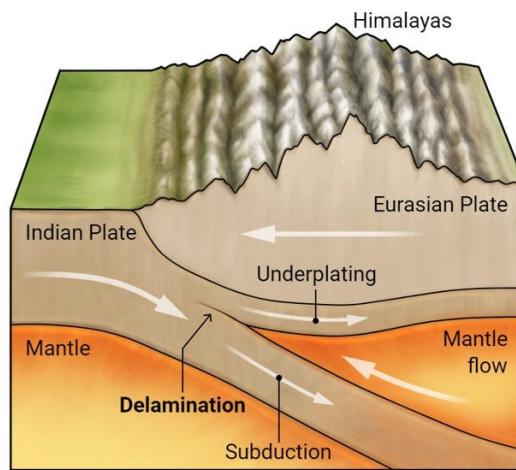
Figura 19: Modelo tectônico do tipo detachment..



Fonte: Adaptado de Burgess e Henry (2005), com base em Arthaud et al. (2008).

Em estágios mais avançados da colisão, a presença de condutores profundos e corpos resistivos subjacentes pode indicar processos de *underplating*, associados ao empilhamento de material máfico na base da crosta continental. Tais processos podem evoluir para delaminação crustal, na qual porções densas da litosfera inferior se destacam e afundam no manto, promovendo ascensão de material quente e favorecendo fusão crustal e magmatismo tardio- a pós-colisional (Figura 20).

Figura 20: Modelo tectônico do tipo underplating.



N. BURGESS/SCIENCE

Fonte: Adaptado de Burgess e Henry (2005), com base em Arthaud et al. (2008).

Esse modelo é amplamente reconhecido em cinturões colisionais modernos, como o Himalaia, e tem sido proposto para a Província Borborema como mecanismo eficiente de espessamento crustal, reativação de zonas de cisalhamento e geração de granitos

cálcio-alcalinos durante a Orogenia Brasiliiana (Burgess; Henry, 2005; Arthaud et al., 2008; Santos et al., 2010; Padilha et al., 2022).

7. Conclusões e considerações finais

A partir dos dados coletados para esta pesquisa e com os modelos de inversão 3D realizados, é possível chegar nas principais conclusões e considerações referente aos limites geológicos e litológicos de Itaú até Paraú.

Todas as series temporais foram devidamente filtradas pelo filtro *FIR* através do código TSMP, os quais permitiram a obtenção de curvas de resistividade e fase lineares e suaves.

Após as filtragens dos dados foi possível realizar o cálculo do tensor de impedância cujo intervalos de frequencia foram de 1000Hz até 1000s, permitindo obter modelos de contrastes de resistividades da ordem dos 50km de profundidade.

Foram realizados modelos de inversão 3D os quais permitiram identificar as principais estruturas geológicas já conhecidas em superfície e estimar a sua continuidade em profundidade através dos contrastes de resistividades.

Na tentativa de produzir modelos que trouxessem todas as arquiteturas geológicas conhecidas em campo, foram gerados modelos de inversão utilizando todas as impedâncias e modelos de inversão utilizando apenas o tensor de fase.

De um modo geral, o modelo de inversão utilizando todas as impedâncias podem produzir modelos que não sejam realísticos ao ambiente geológico, onde uma vez, as impedâncias sofrem distorções galvânicas (*static shift*).

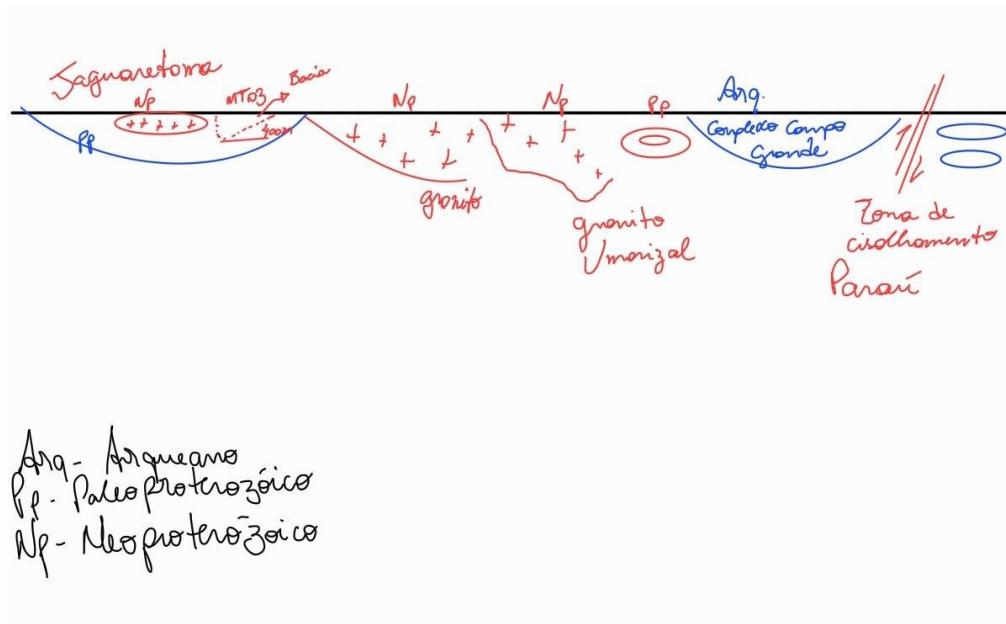
Sobre o modelo utilizando todas as impedâncias (Figura 12), é possível observar que a Zona de Cisalhamento Portalegre não é discretizada no modelo de inversão 3D, entretanto, todas as feições ja conhecidas a exemplo: Bloco Jaguaretama, Bacia de Gangorra, Suíte Granítica Umarizal, Complexo Campo Grande e Zona de Cisalhamento Paraú, se apresentam com forma e geometria de contrastes definidos.

Na tentativa de realçar a Zona de Cisalhamento Portalegre no modelo 3D foi utilizado uma modelagem de inversão utilizando o tensor de fase o qual pouco “perturbado” pela rede elétrica gerando modelos mais realísticos do ambiente geológico.

A partir do modelo de inversão do tensor de fases é possível identificar todas as

feições geológicas conhecidas em superfície a exemplo de: Bloco Jaguaretama, Zona de Cisalhamento Portalegre, Suíte Granítica Umarizal, Complexo Campo Grande e por fim, a Zona de Cisalhamento Paraú que possui contraste de resistividade da ordem dos 50km de profundidade.

Figura 21: Croqui esquemático do perfil Itaú - Paraú.



Através dos modelos de inversão é possível concluir que a Zona de Cisalhamento Portalegre possui geometria horizontal abaixo do Bloco Jaguaretama e se verticaliza no contato com a Suíte Granítica Umarizal.

Na Suíte Granítica Umarizal é possível afirmar a existência de um corpo condutor que pode estar associado com fluidos de mimetização provenientes de xisto ou metassedimentos cálcio-alcalinos ou grafitosos, produzindo líquidos graníticos em superfície.

Conclui-se, que a partir dos modelos utilizando todas as impedâncias e o tensor de fases, a geometria do Complexo Campo Grande em forma de ``domo`` limitado a Zona de Cisalhamento Paraú.

Em ambos os modelos, a Zona de Cisalhamento Paraú é identificada, entretanto no modelo de inversão com tensor de fases, os contrastes de resistividades são mais significativos quando comparados com o modelo de impedâncias.

Ao integrar os modelos de inversão MT com aeromagnetometria é possível identificar que as feições geológicas vistas no contraste de resistividade possuem

assinaturas magnéticas correlatas com as mesmas estruturas geológicas entre os perfis.

Destaca-se neste trabalho que o método MT apresenta importância significativa nos estudos tectônicos, fato este que corrobora para a realização de novas pesquisas na tentativa de contribuir com informações geológica de subsuperfície.

Por fim, sugere-se investimentos para realização de mais levantamentos como estes de modo a ampliar o conhecimento do método nas geociências como um todo. Ademais, trabalhos que se utilizam dessas tecnologias merecem uma atenção de relevância pois à aquisição, filtragem, processamento, modelagem e interpretação requerem um tempo amplo que permita a obtenção de modelos que tragam respostas de alto poder de resolução de informações.

Referências Bibliográficas

- ALMEIDA, F. F. M.; HASUI, Y. *Geologia do Brasil*. São Paulo: Edgard Blücher, 1984.
- ALMEIDA, F. F. M.; HASUI, Y.; BRITO NEVES, B. B.; FUCK, R. A. Brazilian structural provinces: an introduction. *Earth-Science Reviews*, v. 17, p. 1–29, 1981.
- ANGELIM, L. A. de A.; MEDEIROS, V. C.; NOGUEIRA NETO, J. A. *Geologia e Recursos Minerais do Estado do Rio Grande do Norte*. Recife: CPRM, 2006.
- 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.
- BERGAMASCO, F. A. *Aquisições magnetotelúricas 3D na caracterização geotectônica do Núcleo Arqueano Campo Grande-RN, Nordeste do Brasil*. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geologia) – Universidade Federal de Uberlândia, Monte Carmelo, 2024.
- BRITO NEVES, B. B. *Província Borborema: introdução à geologia regional e revisão bibliográfica*. Recife: SUDENE, 1984.
- BURGESS, N.; HENRY, P. Crustal delamination and continental collision. *Science*, v. 307, p. 575–578, 2005.
- CAGNIARD, L. Basic theory of the magnetotelluric method of geophysical prospecting. *Geophysics*, v. 18, n. 3, p. 605–635, 1953.
- CALDWELL, T. G.; BIBBY, H. M.; BROWN, C. Phase tensor analysis of magnetotelluric

- data. *Geophysics*, v. 69, n. 5, p. 1235–1243, 2004.
- CHAPMAN, S.; PRICE, A. T. The electric and magnetic state of the interior of the Earth. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A*, v. 229, p. 427–460, 1930.
- CHAVES, A. D.; JONES, A. G. (ed.). *The Magnetotelluric Method: Theory and Practice*. Cambridge: Cambridge University Press, 2012.
- 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, p. 339–359, 2004.
- EGBERT, G. D.; KELBERT, A. Computational recipes for electromagnetic inverse problems. *Geophysical Journal International*, v. 189, p. 251–267, 2012.
- ESPOSITO, V. A. *Integração de dados geofísicos no estudo da crosta da Província Borborema*. 2016. Dissertação (Mestrado em Geofísica) – Universidade de Brasília, Brasília, 2016.
- FERREIRA, A. C. D. et al. High-pressure metamorphic rocks in the Borborema Province, NE Brazil. Repositório UFMG, 2023.
- JARDIM DE SÁ, E. F. *A Faixa Seridó (Província Borborema) e seu significado geodinâmico*. 1994. Tese (Doutorado) – Universidade de Brasília, Brasília, 1994.
- MACKIE, R. L.; SMITH, J. T.; MADDEN, T. R. Three-dimensional electromagnetic modeling. *Radio Science*, v. 29, n. 4, p. 923–935, 1994.
- MAIA, R. P.; SILVA, T. M.; NASCIMENTO, A. C. Geomorfologia dos maciços de Portalegre e Martins. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 17, n. 3, p. 489–500, 2016.
- NEVES, B. B.; ANDRADE, J. S. Estudo geológico do Complexo Campo Grande. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 84, n. 1, p. 139–150, 2012.
- OLIVEIRA, K. B. *Estrutura litosférica da Província Borborema a partir de dados MT*. 2016. Tese (Doutorado) – UFRN, Natal, 2016.
- PADILHA, A. L. et al. Use of the magnetotelluric method in Brazil and future challenges. *Brazilian Journal of Geophysics*, v. 40, n. 4, 2022.
- PATRO, P. K.; EGERTON, R. Three-dimensional magnetotelluric inversion. *Surveys in Geophysics*, v. 39, p. 861–890, 2018.
- PEDROSA JÚNIOR, A. C. *Avanços da pesquisa geofísica aplicada ao estudo da litosfera no NE do Brasil*. 2015. Tese (Doutorado) – Universidade de Brasília, Brasília, 2015.
- ROMERO, A. M. N. *Joint inversion of magnetotelluric and seismological observations*.

2023. Tese (Doutorado) – UFRN, Natal, 2023.

SÁ, E. F. J. et al. U–Pb and Sm–Nd data of the Caicó Complex. *Geologia USP*, v. 14, n. 3, p. 3–22, 2014.

SANTOS, E. J.; MEDEIROS, V. C. Terrenos e evolução da Província Borborema. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE ESTUDOS TECTÔNICOS, 7., 1999.

SANTOS, J. O. S.; FERREIRA, W. C. Geologia da Província Borborema: uma revisão. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 40, n. 3, p. 457–470, 2010.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (CPRM). *Mapa geológico do Rio Grande do Norte*. Escala 1:500.000. Recife: CPRM, 2021.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (CPRM). *Mapa geológico da Província Borborema*. Escala 1:1.000.000. Recife: CPRM, 2016.

SIAL, A. N.; OLIVEIRA, E. P. Granitoids in Northeast Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 29, p. 460–476, 2010.

SILVA, M. A. *Estrutura elétrica da Província Borborema a partir de dados MT*. 2018. Tese (Doutorado) – Universidade de Brasília, Brasília, 2018.

SIMPSON, F.; BAHR, K. *Practical Magnetotellurics*. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.