

Caracterização de dutos na subsuperfície através de métodos eletromagnéticos não invasivos

Characterization of subsurface pipes using non-invasive electromagnetic methods

Ariston Cardoso¹; Ralph Wendel Oliveira de Araujo²; Luiz Artur dos Santos da Silva³; Rhoman Lima⁴; Ossival Ribeiro⁵; Geisa Nascimento de Santana⁶

¹ Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, CETEC/Física, Cruz das Almas/Ba, Brasil. Email: ariston@ufrb.edu.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0334-5701>

² Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, CCAAB/Ciências Agrárias, Cruz das Almas/Ba, Brasil. Email: ralphwoaraujo@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7205-234X>

³ Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, CETEC/Engenharia Mecânica, Cruz das Almas/Ba, Brasil. Email: luiz_atr@ufrb.edu.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6099-7605>

⁴ Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, CETEC/Ciências Exatas e Tecnológicas, Cruz das Almas/Ba, Brasil. Email: rhomancastro@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-0534-6350>

⁵ Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, CCAAB/Ciências Agrárias, Cruz das Almas/Ba, Brasil. Email: ossival@ufrb.edu.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8275-4954>

⁶ Universidade Federal da Bahia, PPGE/Engenharia Florestal, Cruz das Almas/Ba, Brasil. Email: gns-santana@outlook.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1540-3630>

Resumo: Este estudo aborda a caracterização de dutos na subsuperfície utilizando métodos eletromagnéticos não invasivos, com o uso do condutivímetro modelo PROFILER EMP-400. A medição da condutividade elétrica do solo foi realizada em Jequié, Bahia, Brasil, onde as profundidades de aquisição variaram de 0,1 a 15,0 metros. A metodologia envolveu a criação de vários perfis eletromagnéticos para a detecção de anomalias, correlacionando cada perfil com uma condutividade separadamente, utilizando as frequências de 1 a 16 kHz, os dados foram exportados para o software Oasis Montaj e posteriormente aplicando o método da interpolação por krigagem, assim, foi possível criar mapas de condutividade elétrica e perfis longitudinais, possibilitando a identificação das tubulações com anomalias de condutividade, suas respectivas profundidades e formas. Foi realizada uma modelagem tridimensional com a área de estudo, caracterizando o duto através da anomalia da condutividade, sua profundidade e disposição na subsuperfície. A análise dos dados evidenciou que a técnica de perfilagem eletromagnética é eficaz e útil, sendo uma abordagem não destrutiva poderosa para componentes do subsolo, além de gerar dados de forma precisa e em tempo hábil, tornando-se assim, essencial para aplicações na geologia ambiental, hidrogeologia e prospecção mineral.

Palavras-chave: Perfilagem eletromagnética; Identificação de dutos subterrâneos; Geofísica aplicada.

Abstract: This study addresses the characterization of subsurface pipelines using non-invasive electromagnetic methods, specifically with the use of the PROFILER EMP-400 conductivity meter. The measurement of soil electrical conductivity was conducted in Jequié, Bahia, Brazil, where acquisition depths ranged from 0.1 to 15.0 meters. The methodology involved creating several electromagnetic profiles to detect anomalies, correlating each profile with a separate conductivity measurement using frequencies ranging from 1 to 16 kHz. The data were exported to Oasis Montaj software, and kriging interpolation was subsequently applied. This allowed the creation of electrical conductivity maps and longitudinal profiles, enabling the identification of pipelines with high conductivity, along with their respective depths and shapes. The data analysis demonstrated that the electromagnetic profiling technique is both effective and useful, providing a powerful non-destructive approach for subsurface components. Additionally, it generates accurate and timely data, making it essential for applications in environmental geology, hydrogeology, and mineral prospecting.

Keywords: Electromagnetic profiling; Identification of underground pipelines; Applied geophysics.

1. Introdução

A ausência de projetos e plantas impõe desafios significativos na Engenharia Civil, por falta de plantas a respeito de obras e reformas, gera desafios consideráveis para o setor da construção civil, a falta de informações detalhadas do local antes da execução de um projeto, ou a execução de errada, pode resultar em atrasos significativos nas aprovações de serviços, elevando os custos de construção e em alguns casos, à paralisação total das obras, tal cenário necessita a realização de novos projetos para viabilizar a execução de serviços nas localidades afetadas (AGYEMAN et al., 2016, p.326).

Os métodos de aplicações Geofísicas e de Geotécnicas na engenharia civil têm se intensificado pela necessidade de se utilizar métodos mais eficientes e confiáveis para a avaliação as propriedades do solo in loco, os métodos tradicionais de sondagem, como a sondagem à percussão e a sondagem rotativa, são métodos mais demorados e de custo mais elevado, além disso, esses métodos fornecem números limitados de informações, assim, podendo ocasionar em lacunas nas informações dificultando observar adequadamente as condições do solo (GROVES et al., 2011, p.1364-1377; SOUZA e GANDOLFO, 2012, p.10-27).

Na natureza os solos apresentam uma dificuldade na sua uniformidade de propriedade, elas variam e alguns elementos são mais distribuídos, sendo assim, inviável a utilização de métodos convencionais apresentarem totalmente a subsuperfície investigada, portanto, mesmo que os métodos de amostragem tradicionais apresentem informações detalhadas em locais específicos e pontuais, os mesmos apresentam limitações em número, volume e cobertura espacial, além disso são demorados e caros, tornando impraticável o uso de amostragem pontual em certos casos (PATHIRANA et al., 2023). A alternativa aos cenários restritivos são os métodos não invasivos, entre os quais estão: Indução Eletromagnética, Resistividade Elétrica, Refletância Óptica e Radar (CAMARGO et al., 2001, p.1403-1422; ADAMCHUK et al., 2011, p.12).

Os métodos eletromagnéticos indutivos baseiam-se na propagação de ondas eletromagnéticas de baixa frequência. A indução de corrente elétrica no solo pode ser descrita por um processo de difusão de um campo eletromagnético, onde, desprezando-se as correntes de deslocamento, considera-se apenas as correntes de condução. Quando uma corrente passa por um condutor, é gerado um campo magnético primário em torno do mesmo. Se o fluxo de campo magnético variar em uma espira, provocará o aparecimento de corrente induzida na espira. Este processo é conhecido como indução eletromagnética representada na Figura 01.

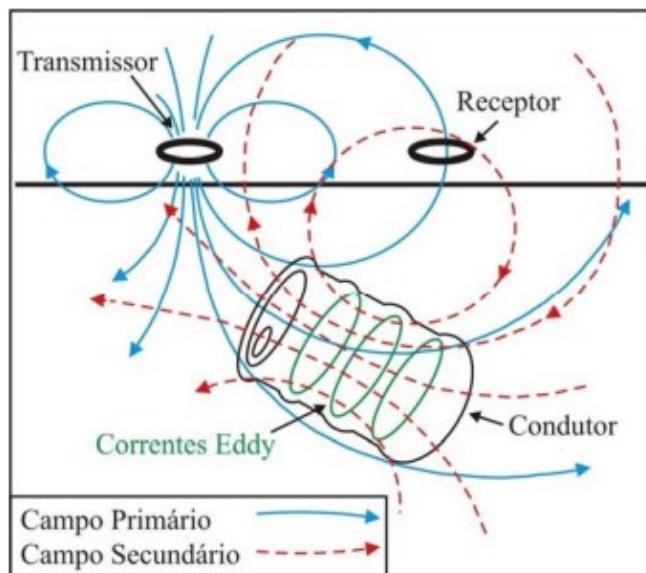


Figura 01 – Caminhos de fluxo de corrente na técnica de indução eletromagnética (EMI).
Fonte: Borges (2002).

As equações para o dipolo magnético são bem conhecidas. De modo que, para um par de bobinas horizontalmente alinhadas (eixo central perpendicular ao solo) e em repouso sobre uma superfície homogênea, o campo magnético pode ser entendido como uma relação de acoplamento mútuo (NABIGHIAN, 1988).

$$\frac{Z}{Z_0} = \frac{2}{k^2 r^2} [(9 + 9ikr - 4k^2 r^2 - ik^3 r^3)e^{-ikr} - 9] \quad (1)$$

onde:

r = distância entre as bobinas, [m];

$k = (\mu\epsilon\omega^2 + i\sigma\mu\omega)^{1/2}$ é a constante de propagação complexa;

$i = \sqrt{-1}$;

σ = condutividade elétrica, $\frac{S}{m} = \frac{l}{\rho}$, onde ρ = resistividade, [$\Omega \cdot m$];

μ = permeabilidade magnética, $\left[\frac{H}{m}\right]$;

ϵ = permissividade dielétrica, $\left[\frac{F}{m}\right]$;

$\omega = 2\pi f$, frequência angular, [Hz];

f = frequência, [Hz];

μ_0 = permeabilidade magnética do vácuo = $4\pi \cdot 10^{-7} \left[\frac{H}{m}\right]$;

ϵ_0 = permissividade dielétrica do vácuo = $8,854 \cdot 10^{-12} \left[\frac{F}{m}\right]$.

μ_r e ϵ_r são a permeabilidade magnética relativa e a permissividade dielétrica relativa, respectivamente

h = altura em relação ao solo

Observando a equação (1), nota-se que o campo resultante pode ser separado em duas componentes: a primeira em fase ou real e a segunda fora de fase ou imaginária. De forma que a relação entre essas componentes são comumente expressas em porcentagem ou pontos por milhão (ppm). Quando observado o domínio da frequência, pode-se notar que o parâmetro de maior é o número de indução B . Cuja a variação de frequência de excitação, em consoante com os diversos módulos de σ , μ , ϵ , alteram a resposta do meio espaço secundário e possibilitam a leitura das ondas resultantes pelo equipamento.

$$B = (\sigma\mu\omega/2)^{\frac{l}{2}} r \quad (2)$$

Quando a altura do dipolo se desvia de zero, é necessário utilizar uma solução analítica completa para resolver os componentes do campo eletromagnético. A solução exige integração numérica tanto para o modelo de meia-espacô homogêneo quanto para modelos de terra elétrica com camadas horizontais. No entanto, a influência crescente da altura e a atenuação dos componentes imaginários (Im) podem ser obtidas usando fórmulas quase-estáticas (FRISCHKNECHT ET AL., 1991) e na faixa LIN, para a configuração HCP, como na equação (3).

$$\frac{Im_h}{Im_0} = [4(\frac{h}{r})^2 + 1]^{-\frac{l}{2}} \quad (3)$$

Através dos métodos analíticos e em concordância com experimentos realizados, pode-se observar que as frequências e as condutividades elétricas do solo influenciam a profundidade de investigação em uma extensão limitada. Saksa & Sorsa (2017) determinou, que a penetração de profundidade para uma frequência de 1 kHz é aproximadamente 12,6 m, e para 10 kHz, aproximadamente 7,1 m, em um solo com resistividade de 100 $\Omega \cdot m$. Já para um solo de 10 $\Omega \cdot m$, a penetração de profundidade a 10 kHz é de aproximadamente 4,0 m.

Após a coleta, dos dados estes são exportados para ambiente de um software de Sistema de Informações Geográficas (SIG) sendo realizados tratamento nos dados e, posteriormente, processados por meio de técnicas de krigagem e interpolação a fim de confeccionar mapas tridimensionais de condutividade para a área de estudo, possibilitando a identificação de anomalias no subsolo. O uso de mapeamento 3D permite a construção de modelos tridimensionais que facilitam a análise de dados geológicos e geotécnicos. Ao dividir o espaço em pequenas unidades volumétricas, chamadas

de voxel, a representação de características complexas do terreno, como camadas sedimentares e variações de resistência elétrica em modelos geológicos 3D torna-se mais próxima à realidade (JØRGENSEN ET AL., 2013).

Na etapa de krigagem dos dados de condutividade é aplicado a equação 01 no software Oasis Montaj para realização da krigagem ordinária visando determinar os valores de toda a área amostral, se aplicado a seguinte equação:

$$Z(x, y, z) = z_0 + \sum_1^n w_i [z(x_i, y_i, z_i) - z_0] \quad (1)$$

Sendo:

$Z(x, y, z)$ é o valor estimado da variável Z no ponto de interesse (x, y, z);

$Z(x_i, y_i, z_i)$ é o valor observado da variável Z na localização de amostra i;

z_0 é o valor médio da variável Z na região de estudo;

w_i é o peso atribuído à diferença entre a amostra i e o ponto de interesse;

n é o número total de amostras observadas na região de estudo.

Sendo possível após a aplicação da técnica a extração do mapa de condutividade da área possibilitando a identificação de possíveis anomalias no subsolo.

O condutivímetro PROFILER EMP-400, ilustrado na Figura 02, é portátil, possui espaçamento entre as bobinas de 1,22 m e opera em multifrequências. O PROFILER EMP-400 conta com um GPS integrado e pesa 4,5 kg, o que permite uma ampla mobilidade. A leitura da condutividade elétrica aparente é efetuada diretamente no equipamento em milisiemens por metro (mS/m). assim, o método Eletromagnético Indutivo emprega ondas de rádio de baixa frequência e pode ser utilizado para estudar a subsuperfície.



Figura 02 – Condutivímetro modelo PROFILER EMP-400 GSSI.

Fonte: Autores (2024).

Este estudo tem como objetivo analisar os dados de condutividade elétrica aparente obtidos por meio de levantamento com o perfilador eletromagnético portátil EMP-400, visando identificar anomalias associadas a variações litológicas e estruturais do subsolo no trecho rodoviário compreendido entre os municípios de Jequié e Maracás.

2. Metodologia

A área de estudo está localizada nas proximidades do trevo viário entre as rodovias BR-116 e BA-130, próximo à Avenida Tote Lomanto, Figura 03, no município de Jequié, região sudoeste do estado da Bahia, Brasil. Fundada em 1897. O clima predominante na região é o semi árido, com temperaturas elevadas durante a maior parte do ano. De acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger, a região de Jequié se enquadra majoritariamente no tipo *Aw*, caracterizado por clima tropical com uma estação seca pronunciada durante o inverno (ALVARES et al., 2013).

De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE; 2020), Jequié tem se consolidado como um importante pólo regional, com destaque para a produção agrícola, além de possuir forte potencial para o desenvolvimento de novas atividades industriais devido à sua localização estratégica no sudoeste baiano.

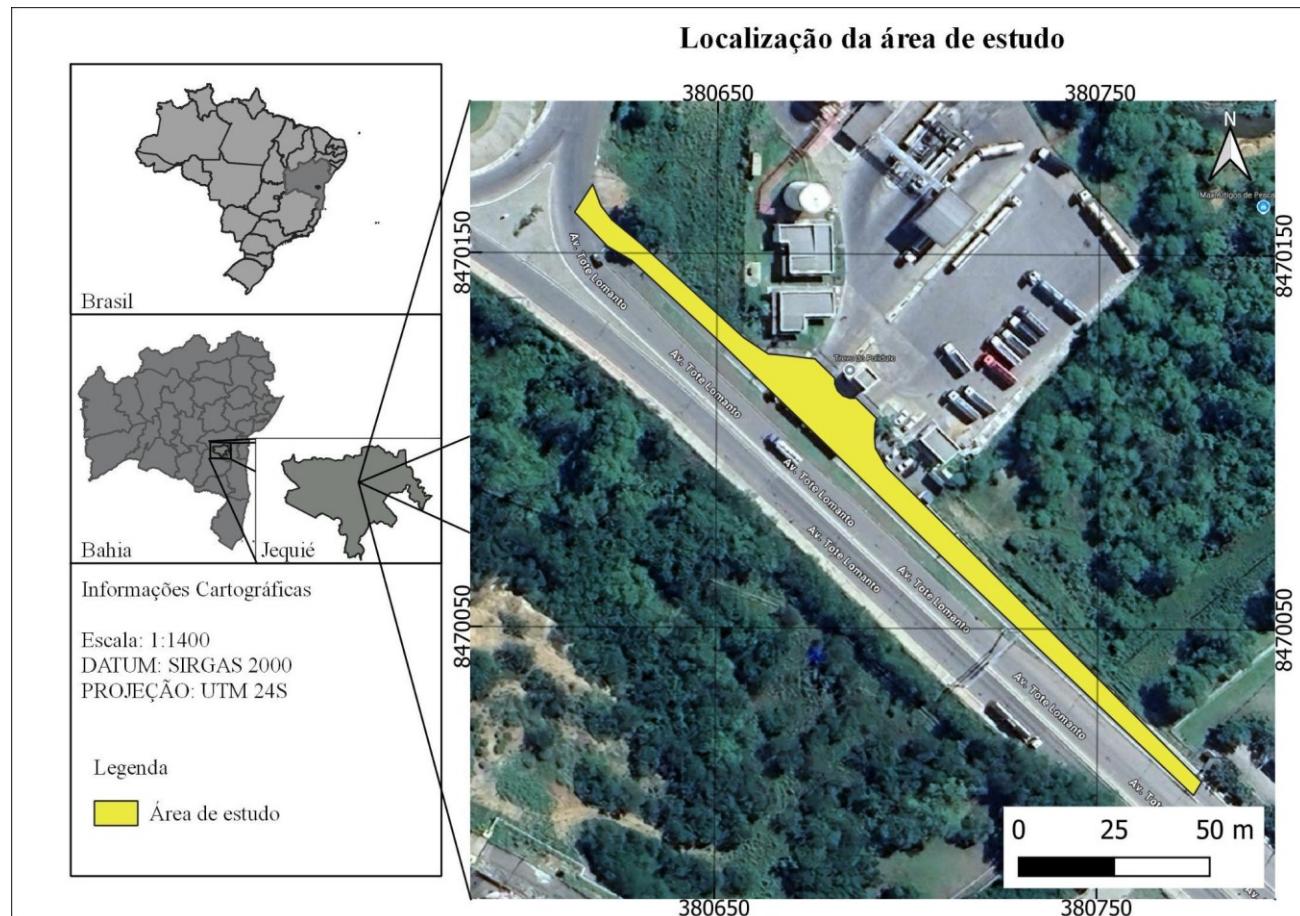


Figura 03 – Determinação da área de estudo no município de Jequié, Bahia.

Fonte: Autores (2024).

Antes de cada coleta de dados, foram realizadas calibragens do GPS e de campo. A calibragem de campo consistiu na coleta de amostras em um ponto arbitrário dentro da área de estudo, respeitando uma distância mínima de 5 metros de pessoas e objetos. Esse procedimento é fundamental para minimizar a interferência no campo elétrico e garantir a precisão dos dados.

Foram realizadas seis coletas de amostras utilizando o EMP-400, abrangendo todo o espectro de operação do equipamento. O espaçamento entre as linhas de coleta foi de 1,5 metros, conforme caminhamento apresentado na Figura 04, utilizando o método de linhas separadas, com cada deslocamento sendo salvo em um arquivo distinto. O intervalo de tempo entre a coleta dos pontos foi de 0,5 segundos, garantindo uma densidade de dados suficiente para uma análise detalhada. A coleta foi feita cobrindo toda a área de estudo, proporcionando uma base robusta para o processamento posterior.



Figura 04 – Caminhamento para coleta de dados de perfilagem eletromagnética.

Fonte: Autores (2024).

Após a etapa de aquisição dos dados de condutividade elétrica, iniciou-se o processamento, cujo objetivo foi eliminar ruídos e realizar modelagens que permitissem a criação de representações tridimensionais do terreno e a identificação de possíveis anomalias. O processamento foi realizado nas seguintes etapas:

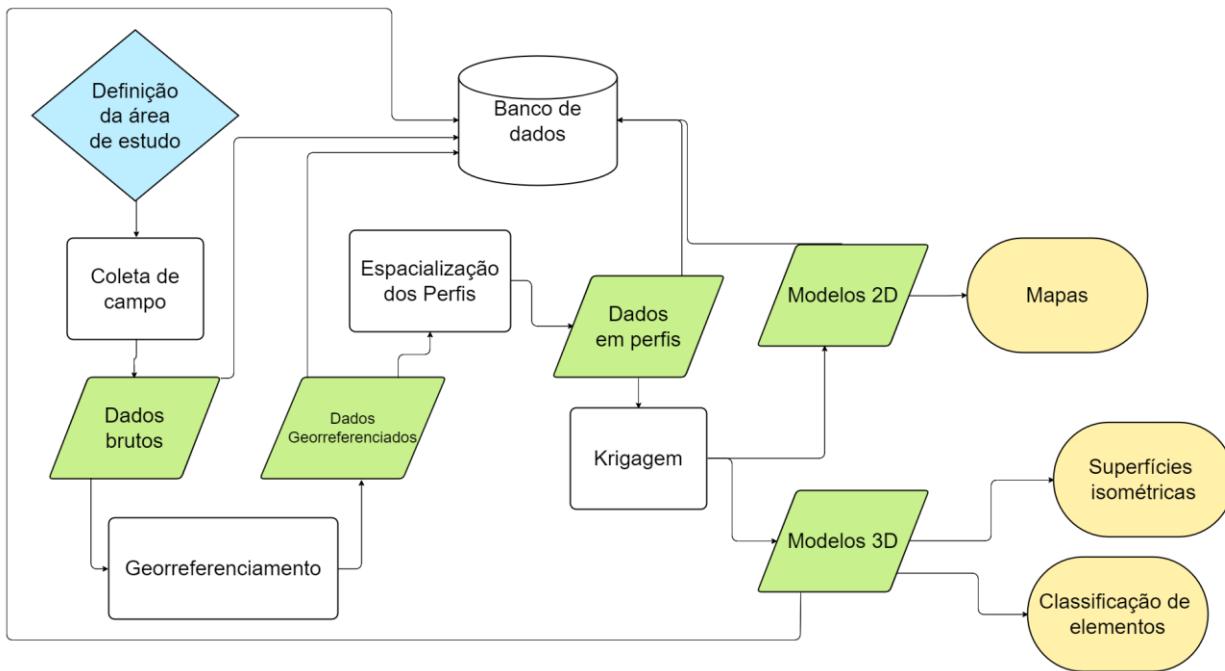


Figura 05 – Fluxograma de processamento.

Fonte: Autores (2024).

A Figura 05 ilustra o fluxograma metodológico adotado para aquisição e processamento de dados geofísicos aplicados ao estudo do subsolo. O processo inicia-se pela definição da área e realização da coleta dos dados brutos em campo, que posteriormente são georreferenciados. Esses dados são armazenados em um banco de dados e espacializados em perfis georreferenciados, que passam por interpolação por krigagem. Como resultados, obtém-se modelos 2D para produção de mapas e modelos 3D, destinados à criação de superfícies isométricas e classificação dos elementos identificados, permitindo análise detalhada das características do terreno estudado.

3. Resultados e discussão

As investigações geofísicas realizadas em ambientes urbanos e antropizados frequentemente enfrentam obstáculos significativos, como observado no estudo conduzido na cidade de Jequié. Durante os levantamentos, foram detectados picos de alta condutividade elétrica em áreas concretadas, atribuídos à presença de malhas de aço. Tal ocorrência constitui um desafio recorrente em levantamentos geofísicos de superfície rasa, sobretudo naqueles que utilizam Métodos de Indução Eletrromagnética (EMI). Elementos antropogênicos com alta condutividade, como o concreto armado com vergalhões, são capazes de atenuar as ondas eletromagnéticas, criando um efeito de blindagem que compromete a investigação de alvos subsuperficiais mais profundos ou adjacentes (AL-HUSSAINY ET AL., 2022; MINECLOSURE, 2019).

Esse fenômeno está fundamentado no efeito físico conhecido como gaiola de Faraday, no qual materiais condutores redistribuem cargas elétricas em sua superfície externa, anulando os campos eletromagnéticos incidentes e blindando o interior da estrutura (HOLSTON; STOKES, 2023). No contexto do levantamento realizado com o equipamento PROFILER EMP-400, essa blindagem impediu a penetração do campo eletromagnético primário além das estruturas condutivas, limitando significativamente a indução de correntes parasitas e, por consequência, a captação dos campos secundários gerados em profundidade (BUNTIN, 2023). Isso tornou inviável a análise precisa das camadas subsuperficiais nessas áreas, reduzindo a confiabilidade dos dados obtidos.

Como medida de mitigação, foi implementada a técnica de offset espacial, na qual os dados obtidos sob a malha condutora e em um raio de 2 metros ao redor foram excluídos do processamento. A Figura 06 ilustra visualmente essa abordagem, que teve por objetivo preservar a integridade e a confiabilidade dos dados remanescentes.

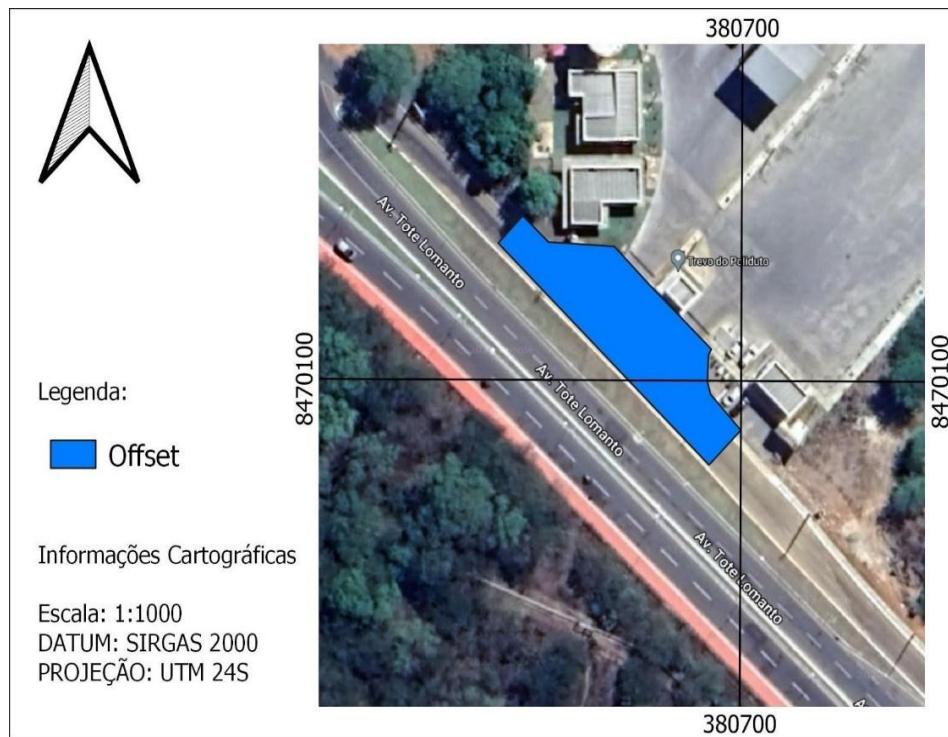


Figura 06 – Delimitação do Offset na área.

Fonte: Autores (2024).

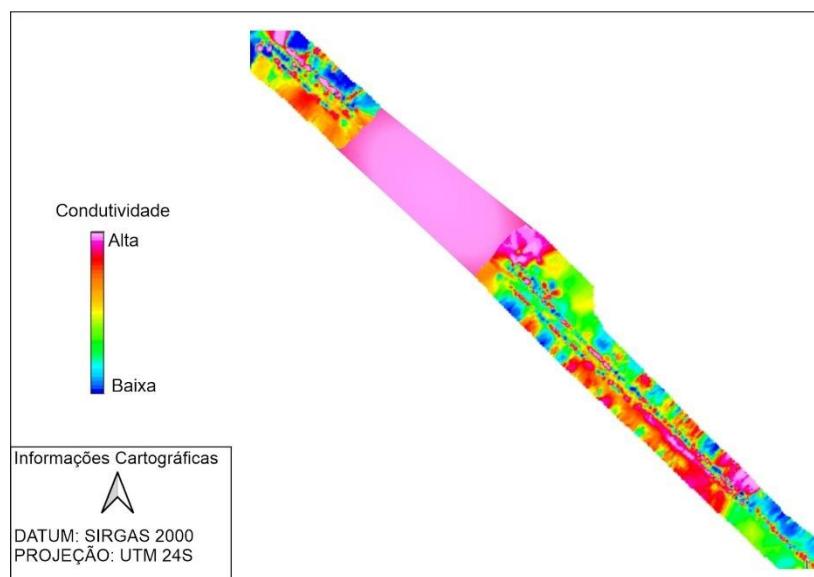
A exclusão de dados contaminados por interferência metálica superficial ou estruturas culturais é uma prática consolidada na interpretação de levantamentos geofísicos (MINECLOSURE, 2019). Contudo, o campo dispõe atualmente de metodologias mais avançadas para tratamento de ruído, incluindo técnicas de filtragem nos domínios da frequência e do tempo, além de métodos como o denoising por wavelet, voltados à melhoria da relação sinal-ruído (AL-HUSSAINY ET AL., 2022).

Após a etapa inicial de aquisição de dados e a aplicação do offset, os dados de condutividade aparente coletados passaram por um processamento crucial que envolveu a interpolação por Krigagem. Essa técnica geoestatística, implementada por meio de softwares como o Oasis Montaj, é fundamental para transformar pontos de medição discretos em campos espaciais contínuos, possibilitando a geração de mapas bidimensionais de condutividade e perfis longitudinais. A Krigagem se diferencia de métodos de interpolação mais simples por basear-se na correlação espacial (autocorrelação) entre os pontos amostrados (JOURNEL; HUIJBREGTS, 1978). O método opera em duas etapas principais: inicialmente, constrói-se um variograma empírico que modela a estrutura de covariância espacial dos dados, quantificando a redução de similaridade entre pontos com o aumento da distância. Em seguida, pesos derivados desse modelo são aplicados aos valores observados, com o objetivo de estimar os valores em locais não amostrados por meio do Melhor Preditor Linear Não Viesado (BLUP), ao mesmo tempo em que se calcula a incerteza associada a essas previsões (ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989). O desempenho da Krigagem depende fortemente de pressupostos como a estacionariedade (constância das propriedades estatísticas da variável no espaço) e a isotropia (uniformidade direcional), embora existam variantes da técnica que flexibilizam tais pressupostos (CHILÈS; DELFINER, 1999). Estudos recentes de modelagem geológica 3D em solos complexos também adotaram a Krigagem para interpolação (FRONT_ES, 2023).

Um dos resultados expressivos desse fluxo de processamento foi a geração de modelos voxel tridimensionais. A modelagem voxel é uma técnica eficaz na visualização geofísica e geológica, pois subdivide o espaço subsuperficial em uma grade tridimensional de células volumétricas (voxels), cada uma representando propriedades específicas, como a

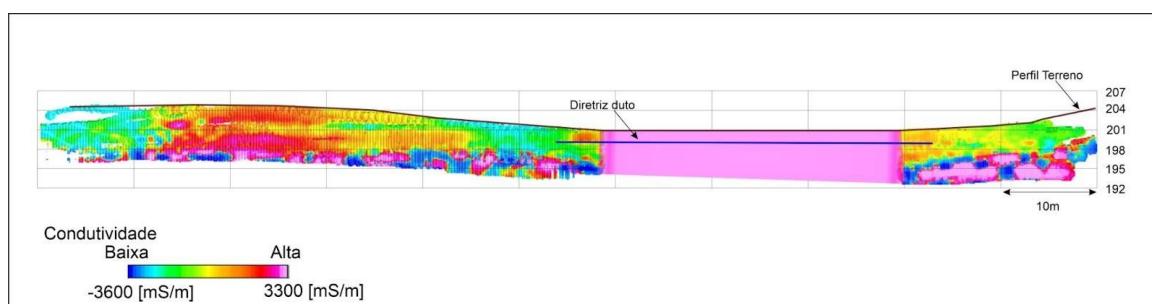
condutividade elétrica. Essa abordagem permite uma representação mais realista e integrada da estratigrafia e das anomalias subsuperficiais, sobretudo em contextos onde há descontinuidades geológicas. Além de sua função visual, os modelos voxel favorecem análises avançadas, como a extração de iso-superfícies e a classificação de elementos detectados, o que facilita a interpretação e pode reduzir o volume de dados necessários para determinadas aplicações (JØRGENSEN ET AL., 2013). Esses modelos também podem ser submetidos a filtragens, análises estatísticas e visualizações em diagramas de cerca, oferecendo percepções tridimensionais aprofundadas sobre o meio investigado. A literatura destaca a crescente importância da integração desses modelos em estudos voltados à identificação de estruturas subterrâneas complexas, como dutos e formações geológicas (CAMBRIDGE CORE, 2015).

Com os dados filtrados, gerou-se o mapa planar de condutividade, Figura 07, Mapa de condutividade elétrica para a área de estudo, e, o perfil longitudinal de condutividade em profundidade Figura 08, Perfil longitudinal da condutividade elétrica. A malha de 1,5 m entre linhas de coleta, aliada à interpolação por krigagem, resultou em um modelo 3D por voxels e iso-superfícies capaz de destacar corpos alongados e linearizados, características típicas de dutos subsuperficiais (PELLERIN, 2002).



*Figura 07 – Mapa de condutividade elétrica para a área de estudo.
Fonte: Autores (2024).*

Junto ao mapa de condutividade é gerado um perfil longitudinal que apresenta a condutividade elétrica em profundidade, conforme Figura 08.



*Figura 08 – Perfil longitudinal da condutividade elétrica para a área estudada.
Fonte: Autores (2024).*

Além disso, estudos recentes demonstraram a eficácia da correção de desvios instrumentais, ocasionados por variações de temperatura, na identificação de tubulações metálicas e cabos enterrados. Essa correção tem sido viabilizada por rotinas de filtragem como Savitzky–Golay e rolling ball, que permitem a revelação de utilidades subterrâneas ocultas (DOOLITTLE & BREVIK, 2014). Estratégias ainda mais sofisticadas têm sido incorporadas por meio do uso de algoritmos de aprendizado de máquina e redes neurais profundas, voltados à eliminação de ruído eletromagnético e à recuperação de dados em ambientes complexos e contaminados (HUANG et al., 2025).

A aplicação combinada da Krigagem e da modelagem voxel, tal como conduzida neste estudo, indica a existência de uma autocorrelação espacial adequada nos dados para sustentar ambas as técnicas. Entretanto, para investigações futuras, especialmente aquelas que visam caracterizar alvos menores ou mais heterogêneos, será essencial realizar uma avaliação rigorosa da densidade amostral, da qualidade do modelo de variograma e da resolução voxel adotada (JØRGENSEN ET AL., 2013). O refinamento iterativo desses parâmetros pode elevar substancialmente a confiança nas interpretações e contribuir para um mapeamento subsuperficial mais robusto e acurado.

A principal contribuição deste estudo reside na diferenciação bem-sucedida de materiais subsuperficiais com base em suas distintas assinaturas de condutividade elétrica (CE). A análise identificou faixas específicas de CE: valores entre -3608 e 0 mS/m foram associados a anomalias subsuperficiais gerais; a faixa de 0 a 300 mS/m foi consistentemente relacionada a solos naturais e materiais rochosos; enquanto a faixa mais elevada, de 301 a 3353 mS/m, correspondente ao valor máximo observado, foi fortemente correlacionada à presença de materiais de alta condutividade elétrica, especialmente metais como cobre, alumínio, ferro e aço. Essa classificação permite a identificação de estruturas antropogênicas inseridas no meio geológico natural. Tal distinção é fundamentada em princípios geofísicos consolidados, os quais estabelecem que condutores metálicos apresentam condutividades elétricas muitas ordens de magnitude superiores (frequentemente acima de 10^7 S/m) àquelas observadas em solos ou rochas não metálicos (PARKHOMENKO, 1967; NABIGHIAN, 1988). A Figura 07, que apresenta o mapa espacial de condutividade elétrica da área de estudo, é um reflexo direto dessa interpretação e permite a visualização das zonas com diferentes níveis de condutividade.

A constatação de que solos com baixo teor de argila e menor teor de umidade, como os solos arenosos ou de textura média, exibem condutividades mais baixas (0–300 mS/m) está em consonância com a literatura hidrogeofísica e pedológica. A condutividade elétrica do solo é uma medida indireta, porém altamente sensível, que se correlaciona com diversas propriedades físico-químicas, como textura, salinidade, mineralogia, porosidade e conteúdo hídrico (SUDDUTH ET AL., 2005; DOOLITTLE; BREVIK, 2014). Solos de granulação mais fina, como siltos e argilas, tendem a apresentar valores mais altos de CE em comparação com areias e cascalhos mais grosseiros, em virtude de sua maior área superficial e capacidade de troca catiônica, que facilitam a retenção de água e íons dissolvidos, fatores diretamente relacionados à condutividade elétrica. A Figura 08, com o perfil longitudinal da CE, complementa o mapa bidimensional ao revelar a variação da condutividade em profundidade, sendo essencial para inferir a profundidade das anomalias detectadas.

O resultado mais relevante foi a associação da faixa mais elevada de condutividade (301 a 3353 mS/m) com materiais metálicos que, quando visualizados no modelo 3D, apresentaram um padrão linear indicativo da presença de tubulações subterrâneas. Esse achado reforça a eficiência da técnica de perfilagem eletromagnética na detecção dessas estruturas. Métodos eletromagnéticos são particularmente eficazes na identificação de objetos condutores, como tubos e cabos metálicos enterrados, devido ao forte contraste de condutividade com o meio geológico envolvente (NABIGHIAN, 1988; GABRYNS; ORTYL, 2020). O princípio envolvido consiste na indução de um campo magnético de corrente alternada pela bobina transmissora, que gera correntes parasitas em objetos condutores próximos. Essas correntes induzidas produzem um campo magnético secundário, detectado pela bobina receptora, permitindo a localização e caracterização da anomalia condutiva (GABRYNS; ORTYL, 2020; MINECLOSURE, 2019). A amplitude e o deslocamento de fase desse campo secundário em relação ao campo primário fornecem informações importantes sobre as propriedades eletromagnéticas dos materiais investigados. Estudos que avaliam a permeabilidade e condutividade de hastes metálicas magnéticas com sistemas multifrequência também comprovam a resposta eletromagnética elevada dos metais (HUANG et al., 2025).

Apesar da aplicação bem-sucedida do contraste de CE para identificar estruturas metálicas, a literatura destaca que a condutividade elétrica do solo é influenciada por diversos fatores além da simples presença de objetos antropogênicos. Isso significa que uma anomalia de condutividade fora da faixa metálica pode ser decorrente de características naturais do solo, como bolsões argilosos, variações no teor de umidade (como a presença de lençóis freáticos suspensos) ou maior salinidade. Por exemplo, uma lente de argila pode gerar um sinal de CE mais elevado do que solos arenosos ao redor (SUDDUTH ET AL., 2005). Essa variabilidade natural pode introduzir ambiguidade à interpretação, pois anomalias moderadas podem ser erroneamente atribuídas ou ter sua origem real mascarada. Tal complexidade ressalta a importância de integrar dados geofísicos com informações geológicas, hidrogeológicas e históricas do local para uma interpretação

mais precisa. Apoiar-se exclusivamente nos valores de condutividade, sem considerar o contexto edafoclimático e geológico local, pode levar a falsos positivos ou interpretações incorretas de feições subsuperficiais.

Investigações futuras devem considerar métodos complementares de validação, como sondagens direcionadas ou trincheiras de teste, em áreas de interpretação ambígua. Além disso, a incorporação de técnicas geofísicas complementares, como o GPR (Ground Penetrating Radar), pode fornecer informações estruturais adicionais e auxiliar na confirmação da presença de feições não metálicas (GABRYS; ORTYL, 2020). Essas abordagens são fundamentais para reduzir a incerteza interpretativa e aumentar a confiança na caracterização das anomalias. Também se destaca a necessidade de calibração local dos dados e da compreensão aprofundada do contexto geológico antes da aplicação de métodos baseados em EMI.

Com base no mapeamento de condutividade elétrica, o estudo identificou duas zonas distintas de alta condutividade interpretadas como anomalias subsuperficiais. A "Interferência 1" (Anomalia 01), apresentada na Figura 09 do artigo original, foi caracterizada como uma "provável tubulação, PVC ou metálica", localizada a uma profundidade média de 7 metros. Este resultado evidencia a capacidade da técnica de perfilagem eletromagnética de detectar estruturas lineares enterradas, mesmo que a identificação precisa do material permaneça limitada com dados exclusivamente obtidos por EMI. Uma segunda anomalia, denominada "Interferência 2", foi interpretada como um "possível tubo de gás" a uma profundidade média de 4 a 5 metros, conforme ilustrado na Figura 10. A diferença nas profundidades atribuídas a cada anomalia reforça a capacidade da técnica em fornecer resolução vertical, um aspecto crítico para a segurança em intervenções de escavação e projetos de infraestrutura.



Figura 09 – Vista superior, localização de anomalia eletromagnética 01.
Fonte: Autores (2024).



*Figura 10 – Vista superior, localização de anomalia eletromagnética interferência 1 e 2, possível tubo de gás.
Fonte: Autores (2024).*

A eficácia da indução eletromagnética na detecção de tubos e cabos metálicos enterrados é amplamente documentada, fundamentada no acentuado contraste entre a condutividade elétrica e a permeabilidade magnética desses alvos em comparação ao solo. Estudos de caso demonstram que, além da simples detecção, a EMI pode fornecer informações sobre o tipo de material (resposta magnética ou condutiva), o diâmetro do tubo e sua profundidade. Por exemplo, foi registrada a detecção precisa de um cabo a 0,56 m de profundidade, previamente conhecido por estar enterrado a 0,5 m.

Apesar da precisão da técnica, diversos fatores podem afetar a confiabilidade da caracterização de tubos por EMI. O alcance do sinal e a acurácia da detecção dependem de variáveis como o diâmetro do tubo, a condutividade elétrica do solo, sendo que solos altamente condutivos podem atenuar o sinal, e o grau de contato entre o tubo e o solo, o que pode provocar perda de corrente por dissipação (GABRYS; ORTYL, 2020). Além disso, embora o EMI seja particularmente eficaz para materiais metálicos, sua aplicabilidade a tubos não metálicos, como os de PVC, é bastante limitada, exigindo a integração com métodos complementares, como GPR (Ground Penetrating Radar) ou levantamentos sônicos (DELEFORTRIE et al., 2014). O GPR, por sua vez, permite a detecção de objetos não metálicos, mas apresenta performance reduzida em solos argilosos ou saturados, devido à atenuação do sinal, além de não permitir a identificação precisa do material do objeto detectado.

4. Considerações finais

A recomendação de que futuras pesquisas aprimorem os padrões de condutividade elétrica para diferentes materiais e refinem os modelos existentes está em sintonia com as tendências da geofísica aplicada. Avanços significativos estão sendo promovidos em áreas como modelagem direta, técnicas de inversão e algoritmos de processamento de dados (Smith, 2012). Os esforços incluem o desenvolvimento de métodos de inversão 3D mais eficientes para estruturas complexas, enfrentando desafios como a não unicidade e a instabilidade dos modelos (SMITH, 2012). Técnicas de filtragem sofisticadas também têm sido desenvolvidas para lidar com ambiguidade nos mapas de condutividade aparente, causada por formas complexas de anomalias, presença de corpos condutores irrelevantes e ruído aleatório (ROGERS et al., 2005; DELEFORTRIE et al., 2014). A incorporação de algoritmos de aprendizado de máquina e redes neurais profundas está abrindo novas possibilidades para redução de ruído e interpretação automática de dados (HUANG et al., 2025).

A reconhecida aplicabilidade da EMI, aliada aos desafios de interferência e incerteza interpretativa (MINECLOSURE, 2019), aponta para uma tendência clara: a evolução de levantamentos baseados em método único para soluções integradas, orientadas por dados e tecnologia. A proposta de aprimoramento de modelos e desenvolvimento de algoritmos avançados sinaliza a necessidade crescente de ferramentas capazes de lidar com a complexidade crescente do subsolo urbano e rural.

A literatura especializada corrobora essa tendência, destacando a utilização de aprendizado profundo para eliminar interferências (HUANG et al., 2025), o avanço na modelagem geológica e de utilidades em 3D (ROGERS et al., 2005) e o conceito emergente de “gêmeos digitais” para representar redes subterrâneas e infraestruturas (LI et al., 2022).

A transição de levantamentos interpretativos para sistemas dinâmicos e preditivos transforma a forma como a caracterização do subsolo é concebida. O futuro da geofísica aplicada caminha para a integração contínua de múltiplos métodos (EMI, GPR, resistividade elétrica, magnetometria), com suporte de ferramentas computacionais avançadas, como inteligência artificial, algoritmos de fusão de dados e modelagem geoestatística (como a Krigagem). Essa convergência permite a construção de modelos volumétricos altamente detalhados e funcionais, que servirão como gêmeos digitais do ambiente subterrâneo (LI et al., 2022). Tais modelos não apenas permitem detectar com precisão anomalias, mas também promovem modelagens preditivas, análises de risco e gestão otimizada de redes e infraestrutura. O estudo desenvolvido em Jequié representa uma etapa significativa nesse caminho, demonstrando as potencialidades da EMI e apontando para um paradigma de investigação geofísica mais integrada, inteligente e aplicada ao desenvolvimento sustentável e à resiliência urbana.

Referências

- ADAMCHUK, V. I. et al. Sensor fusion for precision agriculture. In: Sensor fusion – foundation and applications. Intech Open, 2011. Disponível em: <https://www.intechopen.com/chapters/15910>. Acesso em: 10 ago. 2024.
- AGYEMAN, S.; ASARE, E.; ANKOMAH, E. N. The effects of design information on reliability of progress and cost estimates of construction projects: the case of two civil engineering projects. *American Journal of Civil Engineering*, v. 4, n. 6, p. 326, 2016. DOI: <https://doi.org/10.11648/J.AJCE.20160406.19>. Disponível em: <https://www.sciencepublishinggroup.com/article/10.11648/j.ajce.20160406.19>. Acesso em: 10 ago. 2024.
- AL-HUSSAINY, A. et al. Review on the geophysical and UAV-based methods applied to landslides. *Remote Sensing*, v. 14, n. 18, p. 4564, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-4292/14/18/4564>. Acesso em: 21 nov. 2024.
- ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>. Acesso em: 23 set. 2024.
- BORNIK, A.; NEUBAUER, W. 3D visualization techniques for analysis and archaeological interpretation of GPR data. *Remote Sensing*, v. 14, n. 7, p. 1709, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-4292/14/7/1709>. Acesso em: 21 nov. 2024.
- BORGES, W. R. Investigações geofísicas na borda da Bacia Sedimentar de São Paulo, utilizando-se GPR e eletroresistividade. 2002. 110 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002. Disponível em: https://abrh.s3.sa-east-1.amazonaws.com/Sumarios/19/66e6f540c31cc6eb52c83b8c7fa80061_54dbbc57a83f4ddef808952b41db4c4f.pdf. Acesso em: 29 ago. 2024.
- CAMARGO, F. A. O. et al. Soil sampling strategies for spatial prediction by correlation with auxiliary maps. *Soil Research*, v. 41, p. 1403–1422, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1071/SR03005>. Disponível em: <https://consensus.app/papers/soil-sampling-strategies-prediction-correlation-maps-hengl/5d71842ff9d65353be1386e48341cc7c>. Acesso em: 29 ago. 2024.
- CHILÈS, J. P.; DELFINER, P. *Geostatistics: modeling spatial uncertainty*. New York: John Wiley & Sons, 1999.
- DOOLITTLE, J. A.; BREVIK, E. C. The use of electromagnetic induction techniques in soils studies. *Geoderma*, v. 223–224, p. 33–45, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.01.027>. Acesso em: 11 ago. 2024.
- FRISCHKNECHT, F. C. et al. Profiling methods using small sources. In: NABIGHIAN, M. N. (Ed.). *Electromagnetic methods in applied geophysics: volume 2, application, parts a and b*. Oklahoma: Society of Exploration Geophysicists, 1991. p. 105–270.

-
- GROVES, P. et al. Use of geophysical methods for soil profile evaluation. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 48, p. 1364–1377, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1139/t11-044>. Disponível em: <https://cdnsciencepub.com/doi/10.1139/t11-044>. Acesso em: 12 ago. 2024.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Panorama de Jequié. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ba/jequie/panorama>. Acesso em: 23 set. 2024.
- JØRGENSEN, F. et al. A method for cognitive 3D geological voxel modelling of AEM data. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, v. 72, p. 421–432, 2013.
- NABIGHIAN, M. N. (Ed.). *Electromagnetic methods in applied geophysics: volume 1, theory*. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, 1988. Disponível em: <https://doi.org/10.1190/1.9781560802686.ch5>.
- PARKHOMENKO, E. I. *Electrical resistivity of rocks*. Boston, MA: Springer US, 1967. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4615-8609-8_3. Acesso em: 10 ago. 2024.
- PATHIRANA, S. et al. Ground-penetrating radar and electromagnetic induction: challenges and opportunities in agriculture. *Remote Sensing*, v. 15, n. 11, p. 2932, 2023.
- PELLERIN, L. Applications of electrical and electromagnetic methods for environmental and geotechnical investigations. *Surveys in Geophysics*, v. 23, p. 101–132, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1015044200567>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1015044200567#citeas>. Acesso em: 10 ago. 2024.
- SAKSA, P. J.; SORSA, J. System stability and calibrations for hand-held electromagnetic frequency domain instruments. *Journal of Applied Geophysics*, v. 140, p. 84–92, 2017.
- SOUZA, L. A. P. de; GANDOLFO, O. C. B. Métodos geofísicos em geotecnia e geologia ambiental. *Revista Brasileira de Geologia e Engenharia Ambiental*, v. 2, n. 2, p. 10–27, 2012. Disponível em: <https://www.abge.org.br/downloads/revistas/metodos.pdf>. Acesso em: 9 ago. 2024.
- SUDDUTH, K. A. et al. Relating apparent electrical conductivity to soil properties across the north-central USA. *Geoderma*, v. 125, n. 3–4, p. 279–293, 2005. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169904001334?via%3Dihub>. Acesso em: 10 ago. 2024.