



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA

GUILHERME DE AZAMBUJA VILLANOVA

**APLICABILIDADE DE SIMULAÇÃO 2D DE UM ENSAIO DE TRAÇADOR SALINO
ACOPLADO À TOMOGRAFIA ELÉTRICA PARA DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS
HIDRODINÂMICOS DE UM AQUÍFERO**

Orientador: Prof. Dr. Luciano Soares da Cunha

BRASÍLIA

2025

**APLICABILIDADE DE SIMULAÇÃO 2D DE UM ENSAIO DE TRAÇADOR SALINO
ACOPLADO À TOMOGRAFIA ELÉTRICA PARA DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS
HIDRODINÂMICOS DE UM AQUÍFERO**

GUILHERME DE AZAMBUJA VILLANOVA

Trabalho Final de Graduação em Geofísica do
Instituto de Geociências como requisito para o
título de grau de Bacharel em Geofísica.

Orientador: Prof. Dr. Luciano Soares da Cunha

BRASÍLIA

2025

**APLICABILIDADE DE SIMULAÇÃO 2D DE UM ENSAIO DE TRAÇADOR SALINO
ACOPLADO À TOMOGRAFIA ELÉTRICA PARA DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS
HIDRODINÂMICOS DE UM AQUÍFERO**

GUILHERME AZAMBUJA VILLANOVA

Orientador: Prof. Dr. Luciano Soares da Cunha

Banca Examinadora:

Presidente: Prof. Dr. Luciano Soares da Cunha (UnB/IG)

Membro Interno: Prof. Dr. Marcelo Peres Rocha (UnB/IG)

Membro Externo: Prof. Dr. Renato Alves Borges (UnB/FT/ENE)

BRASÍLIA

2025

Dedico este trabalho aos meus amigos, que me
acompanharam e mostraram o verdadeiro valor
das amizades.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a todos que contribuíram para a minha saúde, pesquisa e escrita. Deixo aqui marcado, meu muitíssimo obrigado, pelas inúmeras colaborações, que tiveram impactos enormes, um grande divisor de águas, impedindo flechas serem disparadas em direções erradas. Aos meus pais, irmão e família. Ao meu Orientador, Luciano Cunha, que sugeriu o tema, a metodologia de pesquisa, a disponibilidade de tempo para me acompanhar e guiar, e teve a coragem e paciência de me dar enormes empurrões e puxões, para que pudesse concluir este documento no prazo. Aos funcionários da UnB e da Fazenda Experimental da UnB(FAL), professores, técnicos e servidores, em especial, um muito obrigado ao, Anderson, Eidimar, Luciano, Reginaldo. Aos alunos do meu orientador, Washington Lago, Matheus Santos, Guilherme Zakarewicz, Caio Benevides, Ana Araújo, Diego Luz e Angelo Rocha. Aos professores, técnicos e amigos do OBSIS, que estiveram dispostos a me acolher. Me ofereceram um local mais tranquilo para escrever e fazer minhas incontáveis leituras, e pela enorme compassividade que tiveram comigo. A Phygeo e seus incríveis membros, Talita Oliveira, Victor Leal, Helen Misaki, Eduarda Araújo, Guilherme Monteiro, Lucas Arantes, Gisele Silva, William Jota, Heitor Valadão e Daniela Liaffa. A meus inúmeros amigos, pelo apoio, suporte e encorajamento, em especial, Lídia Zago, Ruscaia Teixeira, Isadora Oliveira, João Faria, Gabriel Teixeira, João Apolônio, Isaque Lincoln, Eraldo Junior, Cezer Filho, Joyce Silva, Melissa Costa, Erick Nogueira e Yago Castro. E todos que, de alguma forma, oferecerem um pedaço do tempo, para a conclusão desse trabalho. Um grande agradecimento aos professores avaliadores da banca Marcelo Peres e Renato Borges por suas preciosas recomendações e correções. Agradeço também pelos conhecimentos e materiais me disponibilizados, em especial à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES), por meio do Acesso ao Portal de Periódicos.

“Τνῶθι σεαυτόν”

RESUMO

A utilização de Tomografia Elétrica (ERT) em estudos geológicos contribui para a compreensão da estrutura e composição do subsolo. A ERT é uma técnica indireta muito versátil pela sua capacidade de ser não invasiva e de resultado rápido, tornando-se uma ferramenta difundida para o levantamento de recursos naturais. O uso em monitoramentos hidrodinâmicos também é bastante comum. A ERT necessita de propagação de corrente elétrica e, portanto, é limitada pela condutividade elétrica do solo. Em locais onde a condutividade do eletrólito, a qual é o fator mais importante para a propagação, como a água desmineralizada, ou em casos que envolvem o estudo temporal e dinâmico, o uso de traçadores salinos se torna um enorme aliado. Para este trabalho, foi realizada uma revisão sistemática de literatura, a qual teve como objeto de interesse o uso de traçadores salinos em estudos temporais de ERT. A revisão permitiu identificar técnicas, grupos de pesquisa, aplicabilidades, boas práticas e combinações comuns de parâmetros de investigação, como a concentração de traçador, a frequência de leitura e até mesmo o tipo de traçador utilizado. A utilização de traçadores salinos em estudos temporais aumenta significativamente o potencial de aplicação de ERT, mas também implica em maiores custos de implementação. Para minimizar os custos, este trabalho também desenvolveu um código para simulação de um ensaio de ERT com traçadores salinos ao molde de testes na Fazenda Experimental da UnB Água Limpa, utilizando a biblioteca Python PyGIMLi, utilizada para inversões e simulações geofísicas. A simulação permitiu avaliar a dispersão dos traçadores, a influência da frequência de leitura e a resposta do tomograma esperada para uma pequena variedade de cenários. Todos os resultados desse trabalho, até o momento da tese, foram descritos em forma de artigos, que estarão submetidos para publicação em revistas científicas.

Palavras-chave: Traçador Salino, Simulação 2D, Condutividade Hidráulica, Hidrogeologia, Tomografia Elétrica.

Abstract

The use of Electrical Resistivity Tomography (ERT) in geological studies contributes to the understanding of the structure and composition of the subsurface. ERT is a very versatile indirect technique due to its non-invasive nature and rapid results, making it a widely used tool for the assessment of natural resources. The application in hydrodynamics monitoring process is also quite common. ERT requires the propagation of electric current and is therefore limited by the electrical conductivity of the soil. In locations where the conductivity of the electrolyte, which is the most responsible for the propagation, such as low ionized water, or in cases involving temporal and dynamic studies, the use of saline tracers becomes a significant ally. For this work, a systematic literature review was conducted, focusing on the use of saline tracers in temporal ERT studies. The review allowed for the identification of techniques, research groups, applications, best practices, and common combination of investigation parameters, such as tracer concentration, reading frequency, and even the type of tracer used. The use of saline tracers in temporal studies significantly increases the potential applications of ERT but also entails higher implementation costs. To minimize costs, this work also developed a code to simulate an ERT test with saline tracers. Which was based on tests at the Experimental Farm of UnB Água Limpa, using the Python library PyGIMLi, which is used for geophysical inversions and simulations. The simulation allowed for the evaluation of tracer dispersion, the influence of reading frequency, and the expected response of the tomogram for a small variety of scenarios. All the results of this work, up to the time of the thesis, have been described in the form of articles, which will be submitted for publication in scientific journals.

Keywords: Saline Solution, Trace Test, ERT, Geophysics, Hydrogeology.

Sumário

Dedicatória	3
Agradecimentos	4
Epígrafe	5
Resumo	6
Abstract	7
Sumário	8
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	9
OBJETIVO GERAL E ESPECÍFICOS	10
DISPOSIÇÃO TEXTUAL	10
CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	12
TOMOGRAFIA DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA	12
CONDUTIVIDADE E CONCENTRAÇÃO SALINA	20
INJEÇÃO DE TRAÇADORES	21
COMPORTAMENTO DO FLUIDO	21
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	23
CAPÍTULO 3 – ARTIGO CIENTÍFICO 1	24
Utilização de ensaios de traçador salino na determinação de parâmetros hidrodinâmicos com uso de tomografia elétrica: uma revisão sistemática de literatura.	24
1. INTRODUÇÃO	25
2. MATERIAL E MÉTODOS	26
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
4. CONCLUSÃO	33
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	33
CAPÍTULO 4 – ARTIGO CIENTÍFICO 2	37
Aplicabilidade de simulação 2D de um ensaio de traçador salino acoplado à tomografia elétrica para determinação de parâmetros hidrodinâmicos de um aquífero.	37
1. INTRODUÇÃO	38
2. MATERIAIS	39
3. MÉTODOS	41
4. RESULTADOS	46
5. DISCUSSÕES	48
6. CONCLUSÃO	49
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	54
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

O Cerrado brasileiro é a maior região de savana da América do Sul e cobre aproximadamente 24% do território brasileiro (IBGE, 2019; Overbeck et al., 2022). Este bioma é caracterizado por uma rica biodiversidade, com aproximadamente 5% das espécies vegetais e animais conhecidas no mundo, incluindo um elevado número de espécies endêmicas. O Cerrado abrange mais de 2 milhões de quilômetros quadrados no Brasil (IBGE, 2019) (Fernandes Cruvinel et al., 2011a; de Miranda et al., 2014; Morais et al., 2020) e se estende para a Bolívia, Paraguai e Argentina. Esse bioma também desempenha um papel fundamental na regulação do clima da Terra, por armazenar uma quantidade significativa de carbono no solo e na vegetação (Bayer et al., 2006; Terra et al., 2023) e é onde se encontram as principais nascentes que alimentam grandes bacias hidrográficas da América do Sul tais como a bacia Amazônica (rios Madeira, Trombetas e Xingu), São Francisco (rios São Francisco, Paraopeba, Paracatu, Urucuia...), Tocantins-Araguaia com o rio Tocantins e rio Araguaia, Paraguai com o rio Cuiabá e Taquari, e a bacia do Paraná com o rio Parnaíba.

Em um contexto de mudanças climáticas, a compreensão dos impactos potenciais e reais nos recursos hídricos tem sido cada vez mais pesquisado, principalmente, a necessidade de uma análise mais detalhada dos processos hidrológicos que influenciam os fluxos subterrâneos.

A tomografia de resistividade elétrica (*Electrical Resistivity Tomography* - ERT) é uma ferramenta amplamente reconhecida por sua eficácia na caracterização do transporte de solutos em aquíferos, fornecendo dados cruciais sobre a conectividade hidráulica e os caminhos preferenciais de fluxo (Monego et al., 2010; Zouhri & Lutz, 2010). Este método permite identificar variações de resistividade elétrica em diferentes profundidades, diretamente associadas à presença e movimento da água e solutos. Estudos demonstram que a ERT é eficaz na investigação de dinâmicas hídricas em contextos geológicos variados quando combinada com traçadores salinos, (Kuras et al., 2009; Pollock & Cirpka, 2012). Além disso, a acurácia dos modelos de fluxo hídrico subterrâneo depende significativamente da estimativa dos parâmetros hidrodinâmicos, principalmente a condutividade hidráulica. Considerando as limitações práticas e econômicas de medições em campo, ensaios com traçadores salinos e levantamentos geofísicos têm se mostrado alternativas promissoras (Cassiani et al., 2006; Deiana et al., 2007; Monego et al., 2010; Zouhri & Lutz, 2010). Nesses ensaios, uma solução salina é injetada no solo,

e se obtêm dados geoeletricos ao longo do tempo, o que possibilita estimar parâmetros que impactam o fluxo subterrâneo (Deiana et al., 2008; Camporese et al., 2011).

A partir da análise dos artigos principais do tema, por meio de um processo de revisão sistemática, foi observado o uso de simulações computacionais como grande auxílio para trabalhos envolvendo hidrodinâmica. Algumas dessas simulações representam o sistema antes da execução em campo, caracterizando a possibilidade de aplicações em ações de prevenção. Como o uso de simulações prévias é recomendado para aprimorar a precisão na estimativa da condutividade hidráulica, permitindo a avaliação da heterogeneidade e do comportamento da pluma salina (Vanderborght et al., 2005; Crestani & Saladin, 2015). A partir dessa observação, uma simulação numérica foi executada com o uso dos valores encontrados na revisão sistemática e com base em experimentos locais.

OBJETIVO GERAL E ESPECÍFICOS

O objetivo geral é avaliar a aplicabilidade de uma simulação 2D de um ensaio de traçador salino acoplado a uma seção de tomografia elétrica para determinação de parâmetros hidrodinâmicos de um aquífero como a condutividade hidráulica e área de dispersão.

Os objetivos específicos compreendem:

- Identificar como os métodos elétricos são utilizados nas pesquisas com traçadores salinos em estudos hidrogeológicos;
- Identificar as principais redes de pesquisa no tema proposto e caracterizar as pesquisas que estão sendo desenvolvidas;
- Identificar limitações e impactos do uso de simulação 2D para estimar parâmetros hidrodinâmicos como a condutividade hidráulica, a sua vazão, dispersão e potencial hidráulico;

DISPOSIÇÃO TEXTUAL

Este Trabalho Final de Graduação em Geofísica é composto por cinco capítulos distintos, cada um abordando uma etapa específica do estudo. No Capítulo 1 são apresentadas a introdução, objetivo geral e específicos.

No Capítulo 2 é apresentada a fundamentação teórica dos métodos e técnicas aqui utilizados. Dentre este capítulo, estão o funcionamento do método eletrorresistivo e alguns

comentários sobre o ensaio de traçador salino, sua movimentação e simulação 2D da sua resposta de tomografia elétrica.

No Capítulo 3 é apresentado o primeiro artigo, submetido à revista Delos, em fevereiro de 2025. O artigo apresenta uma revisão sistemática de literatura sobre o uso de ensaios com traçadores salinos concomitantes com levantamentos de tomografia elétrica (*Electrical Resistivity Tomography* - ERT). Com finalidade de caracterização de propriedades hidrodinâmicas de aquíferos, principalmente, condutividade hidráulica, além do monitoramento de processos de transporte de solutos em aquíferos porosos (meio homogêneo) e aquíferos fraturados (meios heterogêneos), este artigo conseguiu também, mapear as principais redes de pesquisa envolvidas nesta área.

No Capítulo 4 é apresentado o segundo artigo, a ser submetido à revista Brazilian Journal of Geophysics, o qual recebeu sugestões de correção, pela banca examinadora deste Trabalho Final de Graduação. Os resultados do Artigo 1 nortearam a definição dos objetivos do Artigo 2. Nesta etapa da pesquisa o objetivo é avaliar a aplicabilidade de uma simulação 2D de um ensaio de traçador salino acoplado à tomografia elétrica para determinação de parâmetros hidrodinâmicos de um aquífero.

No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões e considerações finais do estudo, destacando os principais resultados e suas implicações para a continuidade da pesquisa com o tema.

Ao final são incluídas as referências bibliográficas utilizadas ao longo da dissertação, fornecendo uma lista completa das fontes consultadas e utilizadas.

CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

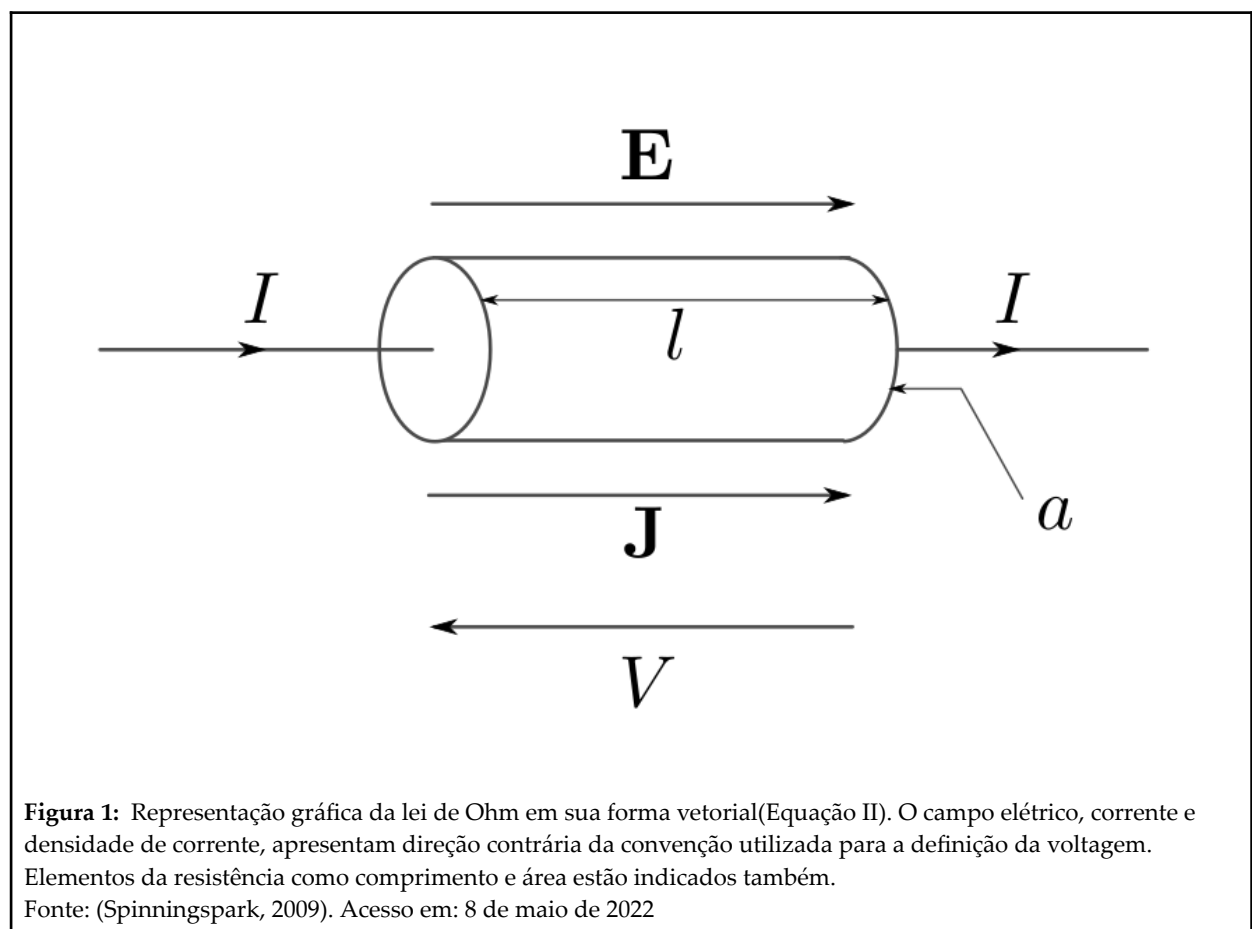
TOMOGRAFIA DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA

A tomografia elétrica consiste em utilizar das propriedades do solo de condução de eletricidade para imageamento da subsuperfície. O fenômeno de condução de eletricidade pode ser explicado simploriamente com a lei de Ohm (Equações II e III), a qual relaciona potencial elétrico (força eletromotriz $\mathbf{V}$), resistividade elétrica ($\mathbf{R}$) que pode ser entendida como a dificuldade de passagem e por último a corrente elétrica (que por definição foi definida como o fluxo de micropartículas com uma carga elétrica supostamente positiva $\mathbf{I}$, foi posteriormente descoberto que, na verdade, a carga era no sentido inverso e composta por elétrons e^- que são as micropartículas com carga negativa.

A medição da passagem de corrente elétrica pelo solo, é o que permite imagear a subsuperfície (Loke, M.H. 2004). Cada medição retorna um valor de resistividade, que descrevem a resistência total do caminho percorrido pelos elétrons.

A medição é baseada na lei de Ohm, que relaciona a densidade de corrente ($\mathbf{J}$) com o campo elétrico ($\mathbf{E}$) e a condutividade elétrica do material (σ). Esta, pode ser representada como resistividade (ρ), ou então por termos de resistência ($\mathbf{R}$), e os valores geométricos de área de condução ($\mathbf{a}$) pelo comprimento de condução ($\mathbf{l}$).

O potencial ($\mathbf{V}$) por se tratar da medição da capacidade de fluxo de carga positiva, como representado pela convenção adotada, apresenta em sentido oposto ao campo elétrico devido à movimentação positiva ser de fato uma carga negativa saindo, como representado na figura 1 e 2.



A corrente elétrica ($\mathbf{I}$), representa a movimentação da energia, com a direção inversa ao fluxo de elétrons (energia atômica), assim como o potencial ($\mathbf{V}$). Um desenho esquemático (figura 2) foi feito para representar essa relação.

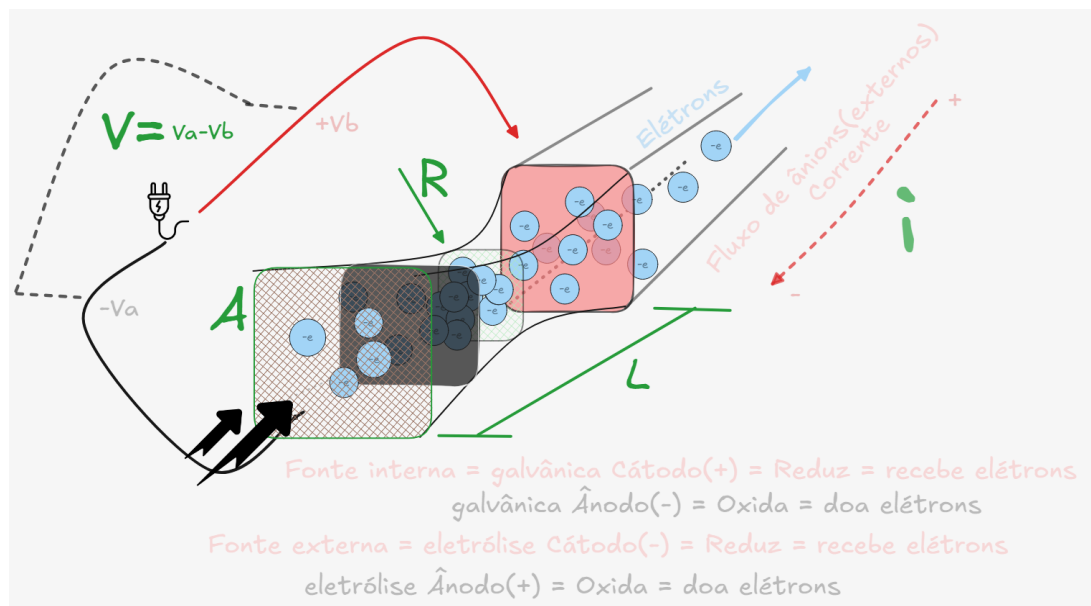


Figura 2: Representação gráfica da lei de Ohm em sua forma mais comum e a esquematização do que é considerado negativo e positivo. O campo elétrico, corrente e densidade de corrente, apresentam direção contrária da convenção utilizada para a definição da voltagem. Elementos da resistência como comprimento e área estão indicados também além de uma alegoria ao reduzir a área de fluxo para representar a resistência.

Fonte: Autor. Licença: Uso livre desde que, citada a fonte.

Ao observar a figura 2 é possível perceber a natureza da diferença de dois pontos da eletricidade, assim como na eletroestática.

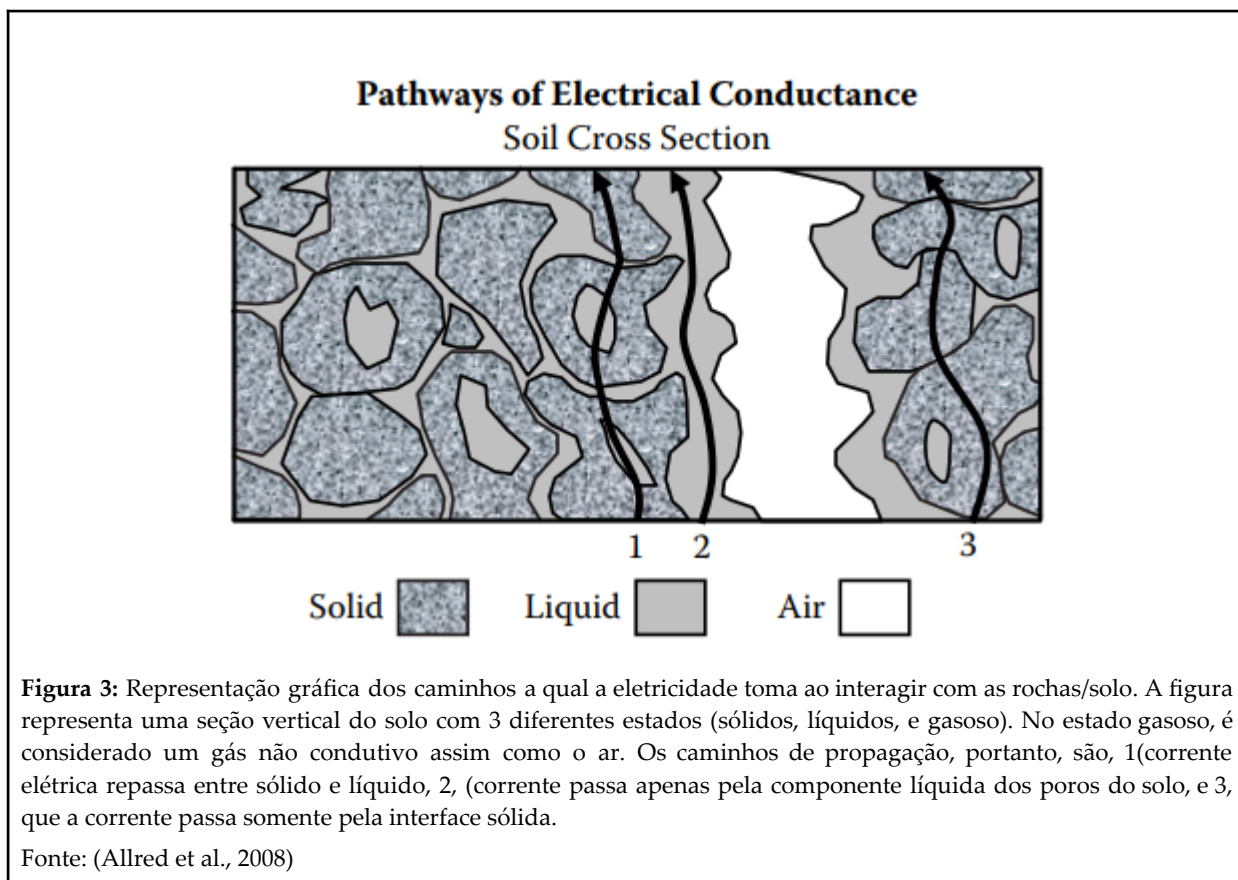
Ao desconsiderar as contribuições da geometria para a resistividade, teremos a resistividade aparente, uma propriedade física do material analisado. Na figura abaixo é possível ver o resultado das contribuições físico-químicas da lei de Ohm, que diz que o campo elétrico em um ponto é proporcional à densidade de corrente nesse ponto, vale ressaltar que a lei de Ohm só é válida para materiais ôhmicos onde a resistência é constante (Keller et al. 1970).

Quadro1: Equações referentes à lei de Ohm.

I	$\Delta V = - \int E \cdot dl$	IV	$V_{cilindro} = \frac{\rho}{2\pi r} I$
II	$J = \sigma E = \frac{E}{\rho} = \frac{I}{a}$	V	$R = \rho \frac{l}{a}$
III	$V = E l = \rho \frac{l}{a} I = R I$	VI	$R = \frac{\rho}{2\pi r}$

O caminho percorrido pela eletricidade, será preferencialmente o de menor resistência apresentando assim uma estimativa da resistividade aparente do total de corrente dissipada em um meio material. Na figura 3 é possível ver os principais caminhos passando exclusivamente por sólidos, líquidos ou em ambos. Em geral, a corrente

passará por alguns pedaços de todos os caminhos até completarem o circuito. O ar, por sua alta resistência, não é um bom condutor.



Dessa forma, ao considerar que o ar não propaga eletricidade e que, líquido e sólido conduzem, podemos adotar um modelo de espalhamento de potencial elétrico, como um semi elipsoide (Keller et al. 1970).

A relação com o campo elétrico pode ser evidenciada ao considerar superfícies equipotenciais, de mesma voltagem, em forma de casca semi elíptica, e a corrente como vários caminhos transversais às superfícies equipotenciais partindo do maior potencial para o menor (figura 4).

O uso de quatro eletrodos, permite a leitura de voltagem (P1, P2) enquanto os outros dois continuam com a função de injeção de corrente (C1, C2). Com a corrente inicial e final conhecida e o potencial intermediário também conhecido, a resistência da área influenciada pode ser obtida de forma aproximada com essa configuração mínima.

Com mudança na condutividade das camadas do solo, um efeito de distorção no campo de superfícies equipotenciais e dos fluxos de corrente ocorre. Quando a resistividade for menor que a anterior, maior será o fluxo de corrente em uma mesma área. O efeito inverso, de menos corrente em uma mesma área, ocorre em uma resistividade maior.

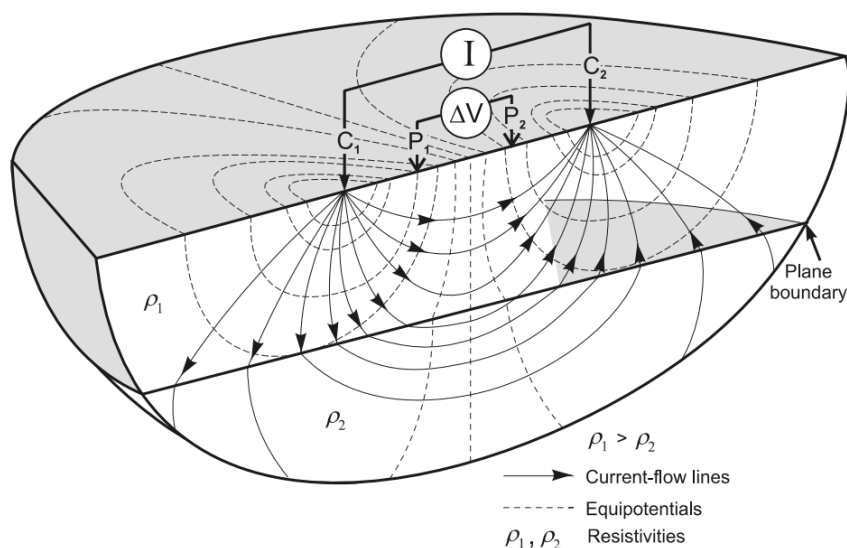


Figura 4: Representação gráfica dos caminhos esperados a qual a eletricidade toma ao interagir com um meio homogêneo por meio da técnica de tomografia elétrica. A figura representa um Semi elipsoide condutivo, com linhas tracejadas para a representação dos campos elétricos equipotenciais devido aos eletrodos e interfaces resistivas, e em linhas contínuas com setas, as frentes do fluxo de corrente.

Fonte: (Allred et al., 2008)

Com a variação das posições dos eletrodos, diferentes profundidades de investigação podem ser analisadas. Ao considerar que o valor de resistividade da semi esfera mais rasa já foi calculada e que há um fluxo preferencial de corrente, o qual obtêm forma de arco proporcional à distância dos eletrodos.

Para o imageamento, duas são as mudanças do conjunto de eletrodos, a primeira chamada de caminhamento elétrico, é realizada ao movimentar o conjunto inteiro lateralmente. O avanço da posição lateral dos eletrodos, estará também medindo o potencial adjacente ao ponto anterior. A segunda forma, conhecida como sondagem elétrica vertical, é realizada quando ambos os eletrodos de corrente são deslocados na mesma metragem lateralmente. Ao manter o mesmo ponto central, o potencial lido será relativo ao sinal de uma profundidade maior.

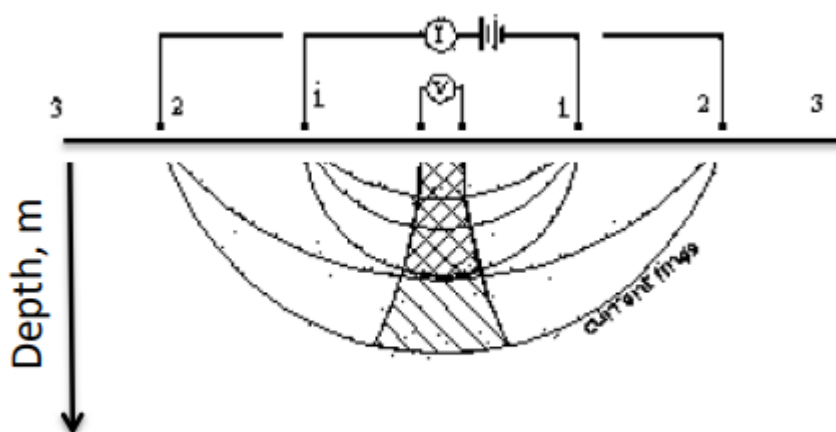


Figura 5: Representação gráfica dos caminhos esperados por meio da técnica de sondagem elétrica vertical (SEV). O corte em seção vertical da figura representa arcos com os principais fluxos de corrente de um sistema homogêneo. Os números indicam a posição dos eletrodos de corrente, para cada leitura dos valores de potencial elétrico na mesma posição.

Fonte: (Raji, 2004)

Para remoção da contribuição geométrica da área de influência, a transformação de resistência para resistividade é realizada através da (equação VI). A distância, porém, deve também ser considerada através da medida das distâncias entre os quatro eletrodos conforme mostrado pelas equações seguintes

As medidas são realizadas segundo a diferença dos valores de corrente injetados (C1 e C2) conforme a equação VII, e para cada eletrodo de corrente será considerada a diferença da distância com os dois eletrodos de medição de potencial (P1 e P2) assim como na equação VIII.

Quadro 2: Equações relacionadas à resistividade aparente e ao cálculo do fator geométrico a partir das distâncias entre os eletrodos.

VII	$V = \frac{\rho I}{2\pi} \frac{1}{r}$
VIII	$V = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_{C1}} - \frac{1}{r_{C2}} \right)$
IX	$\Delta V = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_{C1P1}} - \frac{1}{r_{C1P2}} + \frac{1}{r_{C2P2}} - \frac{1}{r_{C2P1}} \right)$
X	$k = \left(\frac{1}{r_{C1P1}} - \frac{1}{r_{C1P2}} + \frac{1}{r_{C2P2}} - \frac{1}{r_{C2P1}} \right)$
XI	$\rho_a = kR$
XII	$\rho_a = k \frac{\Delta V}{I}$

O processo de aquisição ocorre com a introdução de eletrodos no solo (maior superfície de contato), conectados a um equipamento que realizará a leitura.

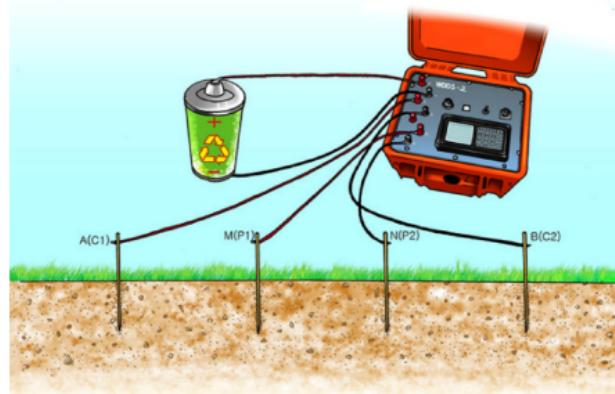


Figure 2: Equipment layout for electrical resistivity survey.
(Image extracted from <http://www.wtsgco.com/index.php>)

Figura 6: Esquema da aquisição e configuração mínima de 4 eletrodos para a execução de uma medida de resistividade elétrica.

Fonte: (Raji, 2014)

Para casos de maior complexidade, e múltiplos eletrodos com um cabo seriado, um equipamento fica responsável da função momentânea do eletrodo, seja ela potencial ou corrente por meio de relés programados. Realizando então diversas leituras.

As operações dos relés, serão feitas de forma automática. Seguindo o arquivo de configuração programado ou seguindo as configurações já difundidas no meio científico chamadas de arranjos. Essas mudanças alternam entre sondagens elétricas verticais e caminhamentos elétricos, retornando, portanto, um trapezoide de pontos de investigação em subsuperfície conforme a figura XXXX.

Entre os arranjos conhecidos, uma notoriedade maior é dada para o Wenner(WN), Schlumberger(WS), Dipolo Dipolo(DD), Polo Dipolo(PD), Polo Polo(PP) e Gradiente(GD).

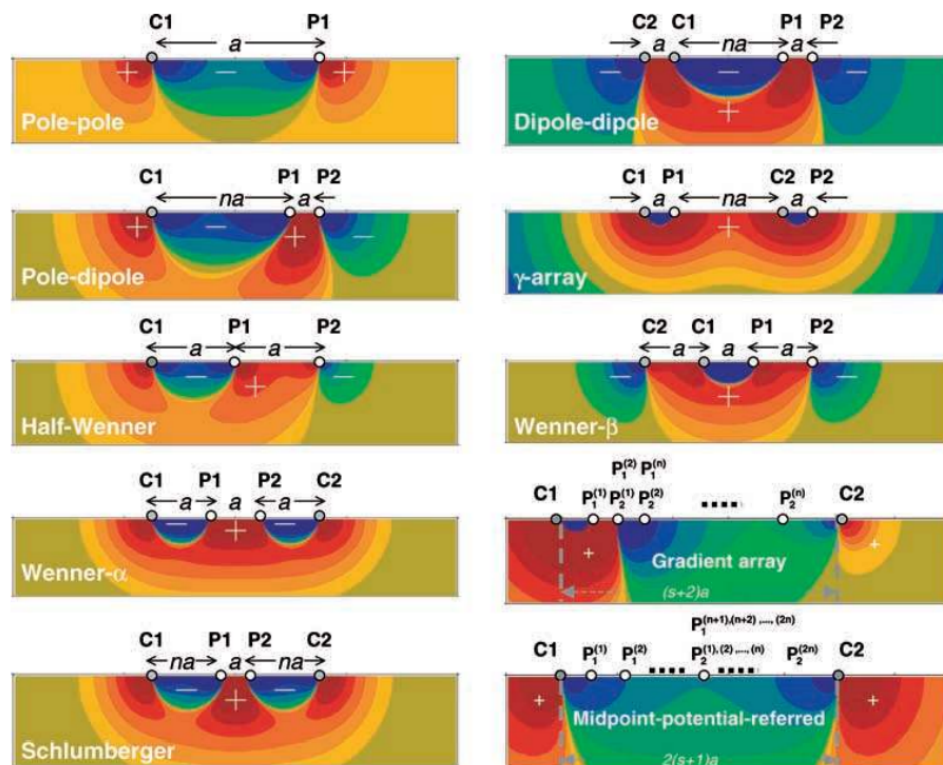
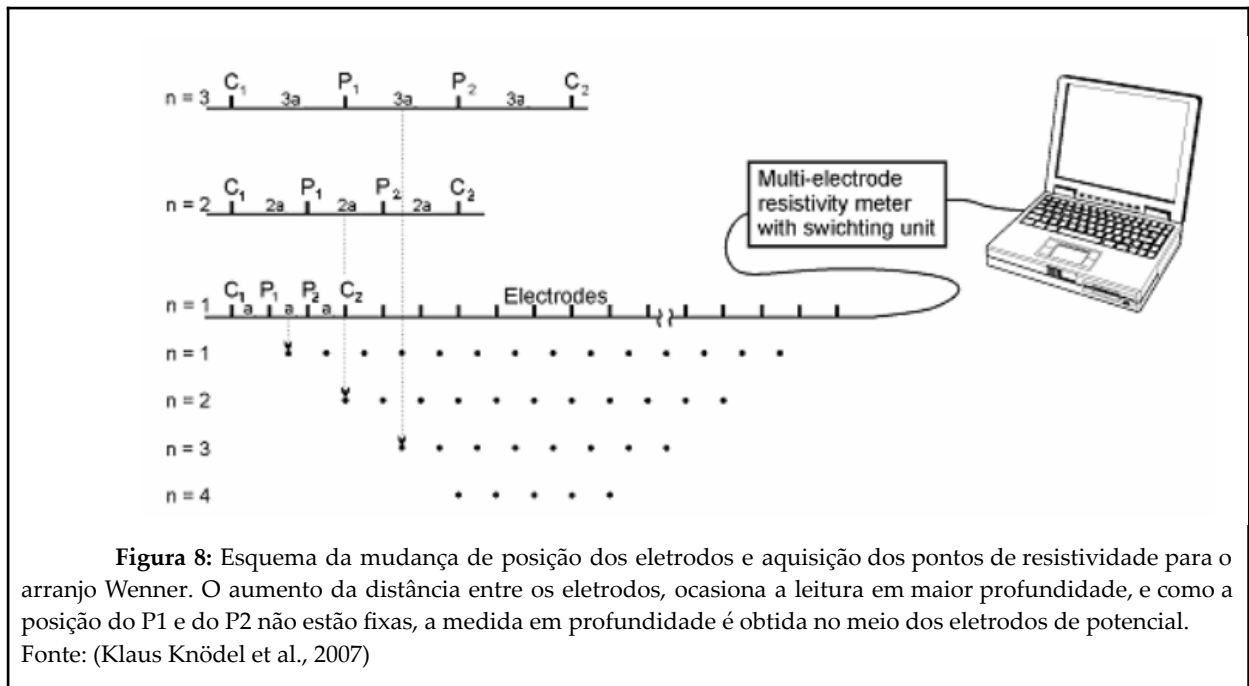


Figura 7: Representação dos efeitos geométricos e as sensibilidades de medição dos principais arranjos.

Fonte: (Dahlin & Zhou, 2004)



Após a leitura esses valores são armazenados em um arquivo de texto padronizado segundo a fabricante. A qual permitem a averiguação e processamento dos dados adquiridos. Uma das etapas de processamento é a interpolação/ponderação dos valores de cada ponto de resistividade adquirido.

Um dos processos fundamentais no processamento de dados geofísicos é a inversão, que pode ser definida como uma abordagem de otimização que busca, com o mínimo de esforço computacional, determinar a configuração do meio que gerou uma determinada resposta elétrica. Este processo pode ser comparado a um mecanismo de identificação do contra processo, pois a inversão busca identificar quais padrões geológicos podem ter dado origem para um padrão de resposta de resistividade específica.

Entretanto, é importante ressaltar que a inversão geofísica, raramente possui unicidade, uma vez que diferentes configurações geológicas podem resultar em respostas elétricas semelhantes (Tikhonov, 1977). Essa ambiguidade implica que múltiplos modelos geológicos podem ser compatíveis com os dados de resistividade obtidos, representando um desafio significativo na interpretação geofísica (Menke, 2012). Portanto, a análise cuidadosa e a consideração de informações adicionais são essenciais para a construção de modelos geológicos mais robustos e confiáveis.

Quadro 3: Equações das condições da parte físico-matemática para a simulação do sistema a partir da equação de Laplace.

XIII	$E = -\nabla V$
XIV	$J = -\sigma \nabla V$
XV	$\nabla \cdot J = 0 \rightarrow -\sigma \nabla \cdot (\nabla V) = -\frac{1}{\rho} \nabla^2 V = 0$

Uma forma de observar a importância da inversão no processamento, é justamente utilizar a modelagem de um bloco, para cada arranjo eletródico, a representação da resistividade será dada distorcida devido à geometria do arranjo.

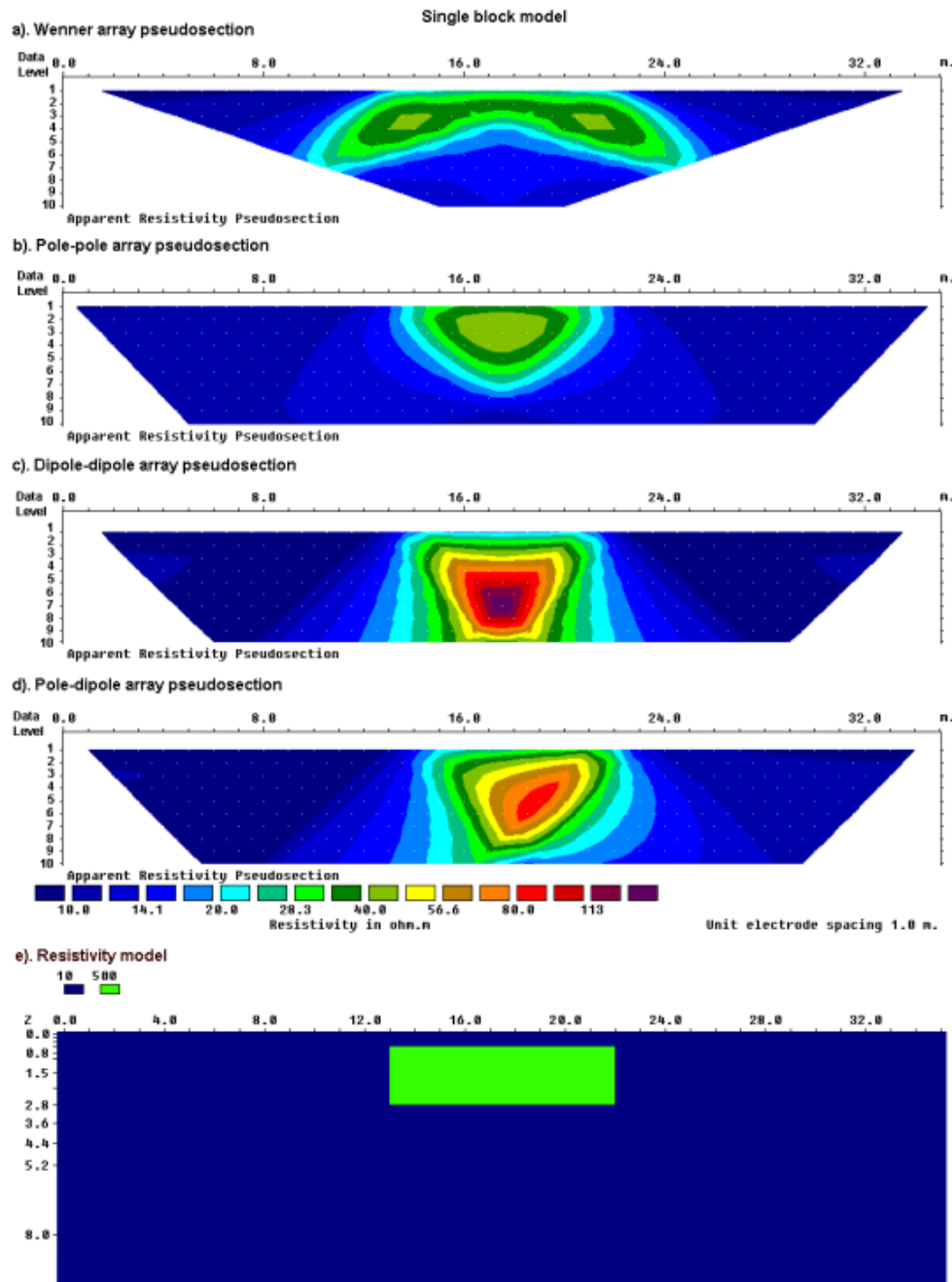


Figura 9: Esquema da aquisição e configuração mínima de 4 eletrodos para a execução de uma medida de resistividade elétrica.

Fonte: (Loke, 2004).

Por último, somente após a inversão, poderíamos de fato tentar responder qual seria o objeto anômalo responsável pela mudança de resistividade. Por ser uma característica física do meio, por meio de contexto geológico, é possível inferir o material anômalo por sua resistividade conforme a figura 10.

Os valores comuns de resistividade, são bem esparsos, mas com auxílio do conhecimento geológico, é possível determinar ao menos a classe geológica do material encontrado no local. A partir da análise dos valores para cada classe contidos em tabelas e bancos de dados disponibilizados.

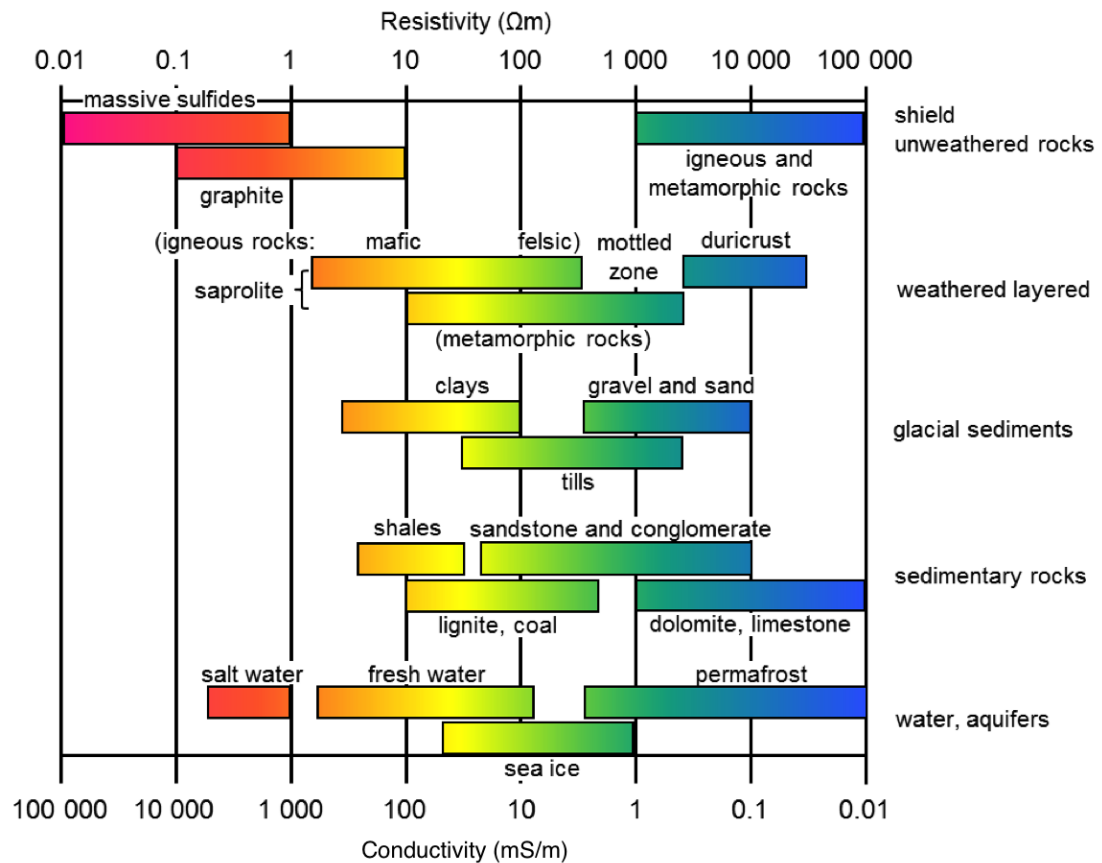


Figura 10: Gráfico dos valores de resistividade aparente, e seu valor equivalente em condutividade para os materiais geológicos mais comuns.

Fonte: (Telford et al., 1990)

CONDUTIVIDADE E CONCENTRAÇÃO SALINA

A relação entre a condutividade elétrica e a quantidade de sal diluída na água, depende de muitos fatores, tal como o sal utilizado, a temperatura e a atual concentração. Para o NaCl, esta relação é considerada linear, a qual pode ser comprovada experimentalmente (Binley et al., 1996).

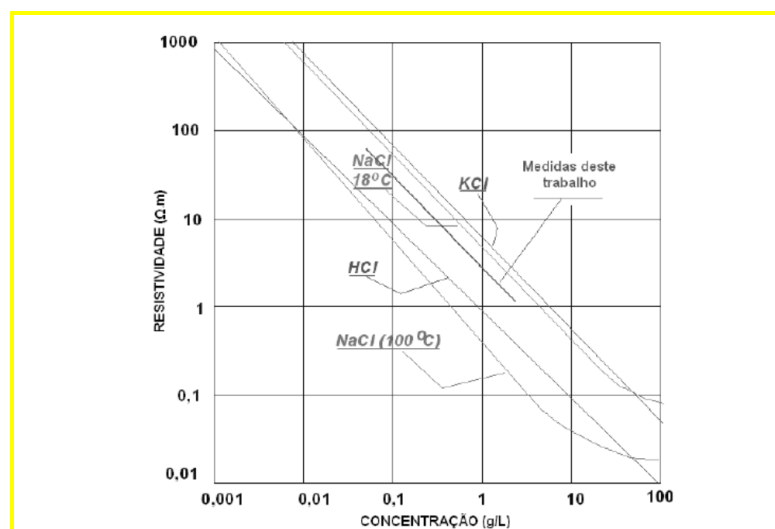


Figura 11: Gráfico da condutividade elétrica do NaCl, para o nível de concentração salina dissolvido.

Fonte: (Gallas et al., 2006)

INJEÇÃO DE TRAÇADORES

O experimento de injeção consiste na introdução de materiais contrastantes, para aumentar o contraste de propriedades desejada. No caso do uso de um traçador salino, tal como NaCl, KCl ou mesmo KI, espera-se o aumento da condutividade elétrica nos locais onde a resposta elétrica do solo é de baixa.

Para que a condutividade possa aumentar de forma efetiva, a injeção é realizada com a dissolução de sais na água, permitindo a movimentação de elétrons livres. O uso de buracos ou poços são bastante utilizados para a injeção desse fluido. No caso deste trabalho, buracos de aproximadamente 80 L e 90,0 cm de profundidade foram utilizados para a inserção do sal no solo.

O fluido inserido no solo é lentamente dispersado pelo solo, permitindo a inspeção da resistividade por meio da tomografia elétrica. O volume do fluido que representa a frente de espalhamento, é muitas vezes chamado de pluma salina. A resistividade elétrica inspecionada, carrega informações desta pluma e consequentemente as propriedades hidrodinâmicas do solo.

Para casos onde a análise de fluidos deve ser mais rigorosa, o uso de bombas hidráulicas é utilizado para verificar mais parâmetros do aquífero, tais como tempo de estocagem e capacidade de armazenamento.

Diversos são os modelos de dispersão dos solutos, os quais se baseiam em fatores como a condutividade hidráulica, densidade do soluto, densidade da solução, a decantação gravitacional, cimentação, compressibilidade ou até mesmo a contribuição das forças iônicas, do raio atômico e a reatividade da interação solo e fluido. A escolha dos modelos se dão a partir das necessidades e condições para aplicação.

COMPORTAMENTO DO FLUIDO

A movimentação de fluidos em meios porosos, como solos e rochas, é um fenômeno complexo que pode ser descrito por uma série de parâmetros e leis fundamentais. A velocidade do fluido, representada por (v) (em m/s). Essa velocidade está diretamente relacionada à vazão volumétrica (Q) (em m³/s), que indica o volume de fluido que passa por corte de seção transversal (A) (em m²) em um determinado intervalo de tempo.

Quadro 4: Equações da lei de Darcy.

A	$\vec{v} = \frac{Q}{A}$	D	$Q = A \frac{-k}{\mu} \frac{\Delta p}{L}$
B	$K = -\frac{k}{\mu}$	E	$\vec{v} = K \nabla p$
C	$\nabla p = \frac{\Delta p}{L}$	F	$\nabla \cdot v = 0$

A Equação B, que representa a condutividade hidráulica (K) (em m/s) é um parâmetro crucial que expressa a facilidade com que a água pode se mover por um meio poroso sob a influência de um gradiente hidráulico. A permeabilidade intrínseca (k) (em m²) é uma propriedade específica do meio que determina essa facilidade de fluxo, enquanto a viscosidade dinâmica (μ) (em Pa·s) representa a resistência do fluido ao escoamento.

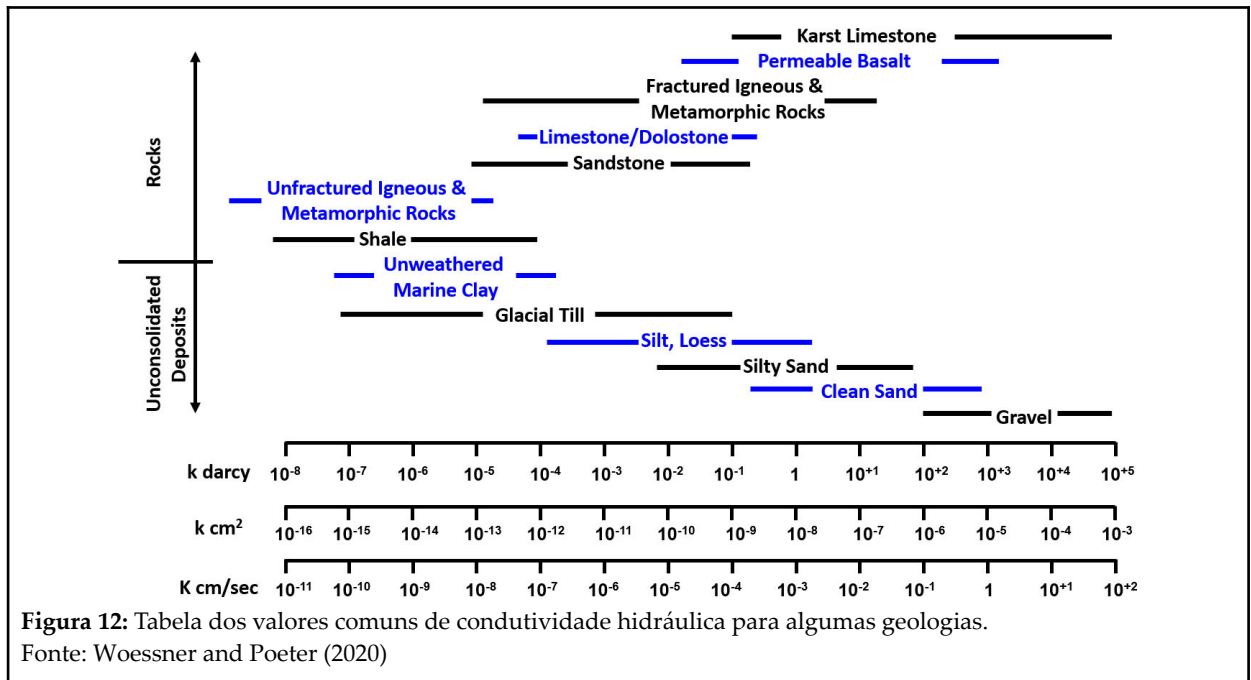
O gradiente hidráulico (Equação C), representado por (∇p) (em Pa/m), é a taxa de variação da pressão com a distância e é fundamental para entender o que faz o movimento do fluido. A diferença de pressão (Δp) (em Pa) entre dois pontos, juntamente com a distância (L) (em m), definem a principal componente do movimento.

A lei de Darcy, (Equação D) utilizada para descrever o fluxo de fluidos em meios porosos, relaciona a vazão (Q) com a permeabilidade (k), a viscosidade (μ), a diferença de pressão (Δp) e a distância (L). Em sua forma diferencial (Equação E), a Lei de Darcy pode ser expressa em termos da velocidade do fluido (v), a condutividade hidráulica (K) e o gradiente de pressão (∇p).

Além disso, a equação F representa a conservação de massa do fluxo é expressa pela divergência da

velocidade ($\nabla \cdot v$), que mede a taxa de variação da dispersão do fluido em um ponto específico. Essa relação é essencial para garantir que a quantidade de fluido que entra em uma região seja igual à quantidade que sai, mantendo assim a condição de continuidade do fluido.

O valor de condutividade hidráulica, por analogia, pode ser visto como a resistência elétrica que também tem uma tabela esquematizada a qual representa os valores referentes ao material, na figura 12 estão expressas os valores de condutividade hidráulica para sedimentos inconsolidados na parte inferior e rochas na parte superior.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allred, B. J., Daniels, J. J., & Ehsani, M. R. (2008). *Handbook of agricultural geophysics*. CRC Press.
- Archie, G. E. (1942). The Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining Some Reservoir Characteristics.
<http://onepetro.org/TRANS/article-pdf/146/01/54/2179020/spe-942054-g.pdf/1>
- Binley, A., Henry-Poulter, S., & Shaw, B. (1996). Examination of Solute Transport in an Undisturbed Soil Column Using Electrical Resistance Tomography. *Water Resources Research*, 32(4), 763–769. <https://doi.org/10.1029/95wr02995>
- Dahlin, T., & Zhou, B. (2004). A numerical comparison of 2D resistivity imaging with 10 electrode arrays. *Geophysical Prospecting*, 52(5), 379–398.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.2004.00423.x>
- Gallas, José & Ribeiro, Vilmondes & Iezzi, Patrícia & Nascimento, Diego. (2006). Desenvolvimento e testes de mini-sonda Wenner para avaliação de contaminações rasas. *Revista Brasileira de Geofísica*. 24.
<https://doi.org/10.1590/S0102-261X2006000400006>.
- Iakubovskii, I. V., & Liajov, L. L. (1980). *Exploración eléctrica*. Reverte.
- Keller, G.V., & Frischknecht, F.C. (1970). *Electrical Methods in Geophysical Prospecting*. Pergamon Press.
- Klaus Knödel, Gerhard Lange, Hans-Jürgen Voigt, & Springerlink (Online Service. (2007). *Environmental Geology : Handbook of Field Methods and Case Studies*. Springer Berlin Heidelberg.
- Loke, M.H. (2004). Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys. *Geophysical Prospecting*, 52(6), 529–551.
- Menke, W. (2012). *Geophysical Data Analysis: Discrete Inverse Theory*. Academic Press.
- Pollock, D., & Cirkpa, O. A. (2012). Fully coupled hydrogeophysical inversion of a laboratory salt tracer experiment monitored by electrical resistivity tomography. *Water Resources Research*, 48(1). <https://doi.org/10.1029/2011wr010779>
- Raji, W. O. (2014). Review of Electrical and Gravity Methods of Near-Surface Exploration for Groundwater. *Nigerian Journal of Technology Development*, 8(1), 31–42.
- Spinningspark. (2009, January 19). File:Ohms law vectors.svg - Wikimedia Commons. Wikimedia.org.
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ohms_law_vectors.svg
- Telford, W. M., Geldart, L. P., & Sheriff, R. E. (1990). *Applied geophysics*. Cambridge University Press.
- Tikhonov, A.N., and Arsenin, V.Y., (1977). *Solutions of ill-posed problems*, John Wiley & Sons, New York.
- Woessner, W., & Poeter, E. (2020). 5.3 Hydraulic Conductivity Values for Earth Materials. *Books.gw-Project.org*. <https://books.gw-project.org/hydrogeologic-properties-of-earth-materials-and-principles-of-groundwater-flow/>

CAPÍTULO 3 – ARTIGO CIENTÍFICO 1

*Artigo submetido à revista Delos, em fevereiro de 2025.

Utilização de ensaios de traçador salino na determinação de parâmetros hidrodinâmicos com uso de tomografia elétrica: uma revisão sistemática de literatura.

Guilherme Villanova¹, Luciano Soares da Cunha¹

¹ Universidade de Brasília, Instituto de Geociências

RESUMO

O emprego da Tomografia Elétrica (ERT) na avaliação e monitoramento da dinâmica dos aquíferos tem sido fundamental para a gestão de recursos hídricos e a compreensão dos processos hidrológicos que os influenciam. A integração da ERT com ensaios de traçadores salinos têm o potencial para identificar as propriedades hidráulicas de aquíferos. Este artigo tem como objetivo executar uma Revisão Sistemática de Literatura (RSL) do uso de ensaios com traçadores salinos concomitantes com levantamentos de Tomografia Elétrica (ERT) na caracterização de propriedades hidrodinâmicas de aquíferos, principalmente, condutividade hidráulica, além do monitoramento processos de transporte de solutos em aquíferos porosos (meio homogêneo) e aquíferos fraturados (meios heterogêneos). O método direto foi utilizado como técnica de RSL a partir da definição da questão principal: “Como os métodos elétricos têm sido utilizados nas pesquisas com traçadores salinos em estudos hidrogeológicos?”. A partir da definição das palavras-chave e dos outros parâmetros delimitadores, as buscas retornaram 42 artigos (*Web of Science*) e 19 (*Scopus*). Os 77% dos artigos com maior vínculo com o tema da pesquisa foram selecionados utilizando um mapa de cocitação que indica a força de ligação entre os artigos citados. Identificaram-se 12 redes principais sendo nucleadas por pesquisas realizadas em laboratório (30%), em campo (60%) e com uso de simulações numéricas antes de ensaios de campo (10%). O arranjo de eletrodos mais utilizado foi o dipolo-dipolo, mas nas pesquisas que ocorreram em tanques em laboratório essa informação não consta nos artigos. A ausência dessa informação chama a atenção porque o tipo de arranjo interfere diretamente no cálculo da resistividade e na acurácia dos modelos geoeletricos obtidos.

Palavras-Chave: Traçador Salino, Hidrogeologia, Tomografia Elétrica, Simulação 2D.

ABSTRACT

The use of Electrical Resistivity Tomography (ERT) in the assessment and monitoring of aquifer dynamics has been fundamental for water resource management and the understanding of the hydrological processes influencing them. The integration of ERT with saline tracer tests has the potential to identify the hydraulic properties of aquifers. This article aims to conduct a Systematic Literature Review (SLR) on the use of saline tracer tests in conjunction with Electrical Resistivity Tomography (ERT) surveys in characterizing the hydrodynamic properties of aquifers, primarily hydraulic conductivity, as well as monitoring solute transport processes in porous (homogeneous medium) and fractured (heterogeneous media) aquifers. The direct method was used as an SLR technique based on the definition of the main question: “How have electrical methods been used in research with saline tracers in hydrogeological studies?”. Based on the definition of keywords and other delimiting parameters, the searches returned 42 articles (*Web of Science*) and 19 (*Scopus*). 77% of the articles most closely related to the research topic were selected using a co-citation map that indicates the strength of the link between cited articles. Twelve main networks were identified, being nucleated by research conducted in laboratories (30%), in the field (60%), and using numerical simulations before field tests (10%). The most commonly used electrode arrangement was the dipole-dipole, but in studies that took place in laboratory tanks, this information is not present in the articles. The absence of this information is notable because the type of arrangement directly affects the calculation of resistivity and the accuracy of the obtained geoelectric models. The analysis of the results of this SLR concluded that electrical tomography tests accompanied by the injection of saline fluids into the medium have a high potential to estimate the hydrodynamic properties of the investigated aquifers, both porous (homogeneous medium) and fractured (heterogeneous medium).

Keywords: Saline Solution, Trace Test, ERT, Geophysics, Hydrogeology

1. INTRODUÇÃO

A avaliação e monitoramento da dinâmica dos aquíferos são fundamentais para a gestão de recursos hídricos e a compreensão dos processos hidrológicos que influenciam o fluxo hídrico subterrâneo. A tomografia de resistividade elétrica (*Electrical Resistivity Tomography* - ERT) tem sido amplamente utilizada como uma ferramenta eficaz na caracterização do transporte de solutos em aquíferos, fornecendo informações essenciais sobre a conectividade hidráulica e os caminhos de fluxo preferenciais (Archie, 1942; Monego et al., 2010; Zouhri & Lutz, 2010). O método ERT permite a identificação da variação lateral e em profundidade da resistividade elétrica dos materiais terrestres, diretamente relacionada à presença e movimentação de água e solutos. Estudos com ERT e traçadores salinos em diferentes contextos geológicos têm sido avaliados visando melhor compreender a dinâmica hídrica subterrânea (Kuras et al., 2009; Pollock & Cirpka, 2012).

Investigações anteriores demonstraram o potencial dos traçadores salinos para identificar as propriedades hidráulicas dos aquíferos. Por exemplo, estudos realizados em ambientes não confinados e na zona vadosa mostraram que a ERT é válida para monitorar a infiltração e dispersão de traçadores, revelando a relação entre a resistividade elétrica e as características dos fluxos em meios porosos (Pollock & Cirpka, 2008; Kim et al., 2010;). A capacidade da técnica geofísica ERT em detectar essas dinâmicas foi corroborada em testes com diferentes arranjos eletródicos, que ajudaram a determinar a evolução da pluma de traçador em aquíferos heterogêneos (Singha & Gorelick, 2005; Muller et al., 2010).

Além disso, a combinação de ERT com simulações numéricas têm se mostrado eficaz na caracterização de propriedades hidráulicas e na interpretação do transporte de solutos (Vanderborght et al., 2005; Crestani et al., 2015). A integração de múltiplas técnicas com monitoramento de longo prazo têm contribuído para constatar a eficácia da ERT em estudos hidrogeológicos, como evidenciado em ambientes cársticos e em áreas urbanas (Robinson et al., 2016; Martel et al., 2018).

Diante dessas evidências, este artigo tem como objetivo executar uma revisão das aplicações da ERT na caracterização de aquíferos com ênfase no uso de traçadores salinos para estimar as propriedades hidrodinâmicas e monitorar processos de transporte de solutos.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Para a elaboração dessa revisão sistemática foi utilizado o Método Direto (Castro & Cunha, 2021; Zakarewicz et al., 2024) dentre os diversos métodos de RSL consagrados. As principais etapas foram: (i) Elaboração do Protocolo da revisão, que inclui a formulação da Questão Principal, Palavras-Chave, Critérios de Inclusão/Exclusão e Seleção das Bases de Dados; (ii) Busca dos estudos primários (artigos) nas Bases de Dados; (iii) Seleção dos estudos primários, baseada nos critérios de inclusão/exclusão; (iv) Extração de dados usando uma ficha-síntese elaborada em paralelo ao protocolo; (v) Análise e síntese dos dados extraídos.

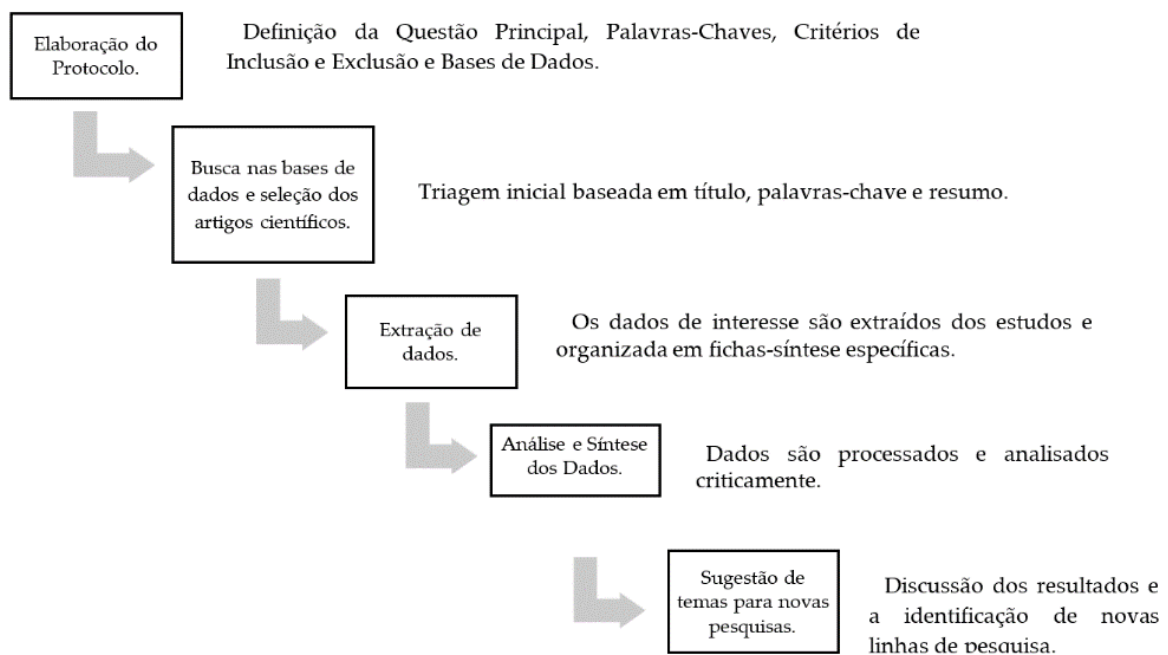


Figura 1: Fluxograma com as principais etapas do método direto Castro & Cunha, 2021 utilizado neste trabalho.

Os parâmetros delimitadores utilizados para este trabalho são apresentados no Quadro 01. A questão principal foi definida como: “Como a tomografia elétrica (ERT) tem sido utilizada para estimar parâmetros hidrodinâmicos com o uso de traçadores salinos?” As palavras-chave foram definidas a partir da consulta em artigos científicos conhecidos, em artigos científicos que retornaram em consultas simples em buscadores não estruturados (p.ex. Google). As *strings* foram elaboradas com o intuito de potencializar a busca nas bases de dados selecionadas. Ao final do processo, as strings foram definidas como (((ERT OR *electroresistivity*) AND (*tracer test*)) OR (*tracer test*)) e ((ERT OR *resistivity*) AND (*aquifer*)) OR ((ERT OR *resistivity*) AND (*aquifer* AND *saline tracer*)). Os critérios de inclusão foram utilizados para realizar a 1ª etapa de filtragem dos dados obtidos nas bases de dados. Pelo fato de alta representatividade e uma opção de exportação das buscas em formatos lidos pelo VOSViewer tais como .txt e .csv. As

buscas foram realizadas nas bases de dados Web of Science (WOS) e Scopus utilizando as *strings* e demais delimitadores.

Quadro 01: Parâmetros do Protocolo definidos para a pesquisa.

Itens	Parâmetros utilizados
Questão Principal	“Como a tomografia elétrica (ERT) tem sido utilizada para estimar parâmetros hidrodinâmicos com o uso de traçadores salinos?”
Palavras-chave estruturadas (<i>strings</i>)	((((ERT OR <i>electroresistivity</i>) AND (<i>tracer test</i>)) OR (<i>tracer test</i>)) e ((ERT OR <i>resistivity</i>) AND (<i>aquifer</i>)) OR ((ERT OR <i>resistivity</i>) AND (<i>aquifer</i> AND <i>saline tracer</i>)).
Base de Dados	Web of Science e Scopus.
Delimitadores	Ano de publicação: 1945 a 2023. Tipo de publicação: artigos disponíveis no Portal CAPES. Idioma: Inglês. Área da pesquisa: sem restrição.
Critérios de Inclusão (I)/ Exclusão (E)	(I) Pesquisas com o uso tomografia elétrica e traçador salino; (I) Artigos científicos completos disponíveis no Portal CAPES; (E) Não trata de ERT aplicado com uso de traçadores; (E) Não está no idioma selecionado; (E) Registros sem abstract. (E) Teses e Dissertações.

Obteve-se 42 na Web of Science (WOS) e 19 na Scopus totalizando 61 artigos. Os registros completos obtidos em cada base de dados foram exportados no formato “txt e csv”, respectivamente. Para a última etapa de seleção de artigos utilizou-se a ferramenta bibliométrica da cocitação no software VOSviewer versão 1.6.6 (Waltman et al., 2010).

No mapa de cocitação é calculado de forma sistematizada e replicável, o quanto um par de referências bibliográficas em um artigo está citado nos demais artigos do conjunto exportado (txt e csv). (Quem é mais citado, por quem mais publica). Por exemplo, ao restringir o número mínimo de cocitações utilizando os 42 registros pré-selecionados da WOS foram analisadas automaticamente 1454 referências bibliográficas. Considerando 3 citações mínimas de cada par de artigos, a força de ligação foi calculada retornando um total de 32 artigos. Quanto maior a restrição indicada (número de citações) menor será o número de artigos selecionados (Figura 2). O processo foi executado nos registros da Scopus obtendo-se 15 artigos. Assim, um total de 47 artigos foram utilizados para o desenvolvimento das demais etapas do trabalho. Os artigos não

selecionados nessa fase mostraram-se parcialmente vinculados ao tema desta revisão sistemática. Para não gerar preferências devido à relação de idade do artigo e número de citações, existe a etapa de acoplamento, a qual trabalha diretamente com os artigos mais recentes.

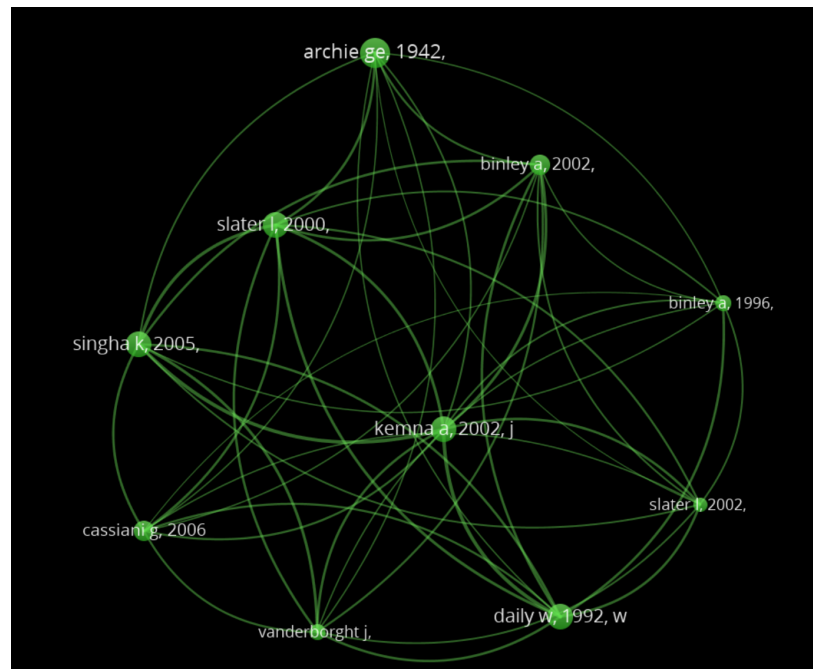


Figura 2: Mapa de cocitação ressaltando a força de ligação entre os artigos. A intensidade da força de ligação está refletida pela distância entre os artigos (círculos). Um número de 7 citações mínimas de cada par de artigos foi utilizado para gerar esse mapa. O retorno desses 10 artigos indica indiretamente quais os 10 artigos mais citados nos artigos científicos que pesquisaram a temática em questão. Os registros utilizados neste mapa foram os exportados da WOS no período de 1945 a 2023. (Fonte: Web of Science).

Em uma etapa seguinte, os artigos selecionados foram transferidos para o *software* Mendeley Reference Manager (Elsevier, v.2.114) para melhor gerenciamento e acesso dos pesquisadores. Nesta etapa foi realizada a extração de dados de cada um dos 47 artigos com o auxílio de Tabela-Síntese. Essa tabela foi estruturada em colunas que incluem os parâmetros mais importantes identificados: referência do artigo, objetivo, tipo de traçador, tipo de experimento (campo ou laboratório), nível freático, métodos geofísicos utilizados além da ERT, arranjo eletródico, profundidade máxima investigada, principais resultados e conclusões.

No processo de extração de resultados foi testado a capacidade de utilização de Inteligência Artificial Generativa por meio do uso do aplicativo SciSpace (<https://typeset.io/>), voltado para o meio científico. Os resultados não foram satisfatórios para total autonomia do processo de extração. A generalização excessiva, ignorância de conteúdos explicitamente escritos no texto como os objetivos do trabalho, ou mesmo a não compreensão e interpretação

correta das técnicas e suas ramificações/aplicações. Excessivas tentativas foram utilizadas, mas mesmo com uso exaustivo de palavras-chave, termos, comandos e peso dos parâmetros, personalizados para a busca no texto, houve dificuldade de extração de palavras, frases, e valores para a geração de uma tabela de comparação entre os artigos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 3 apresenta um Mapa de Coautoria utilizando os países de origem das instituições de pesquisa como unidades de análise. Observa-se que as principais redes de pesquisa são centradas em uma associação principal formada pelos Estados Unidos (USA), Itália, Inglaterra, Alemanha e na Dinamarca, Japão e Austrália, secundariamente. Esse grupo de países dominaram as publicações até próximo de 2015, quando novos núcleos de pesquisas ainda muito incipientes em termos de citações surgem na China, Escócia e Tunísia.

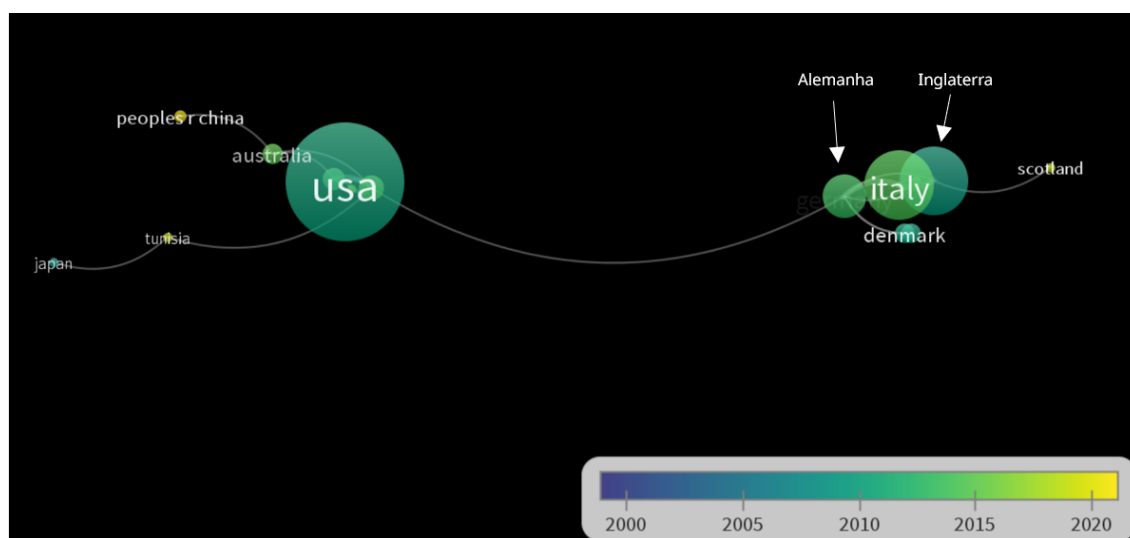


Figura 3: Mapa de coautoria usando os países como unidade de análise e número de citações como peso. A distância relativa dos núcleos do cluster indica a proximidade dos grupos de pesquisa, a espessura das linhas indica a intensidade da colaboração e o número de citações, o diâmetro de cada círculo. Embora os EUA representem a liderança central quando considerado o total de documentos citados, a Itália já ocupa um papel proeminente, seguido de Inglaterra e Alemanha com um número expressivo de citações até 2015. Nos últimos anos do período de análise, novos núcleos de publicações com citações têm surgido em outros países, p.ex., China. (Fonte de dados: Web of Science; Mapa: VOSViewer).

A Figura 4 apresenta o Mapa de Coautoria utilizando os autores como unidade de análise. Com esse resultado é possível evidenciar como estão constituídas, distribuídas e estruturadas as redes de pesquisas. Observam-se 12 redes principais sendo nucleadas por pesquisas voltadas para avaliar as propriedades hidrodinâmicas do aquífero com ensaios de traçador salino acompanhados de investigações com tomografia elétrica. Essas pesquisas têm

suas especificidades, apresentando eventualmente alguns objetivos específicos como o monitoramento 3D em tempo contínuo por transmissão de dados via satélite (p.ex., Kuras et al., 2009; Wilkinson et al., 2010).

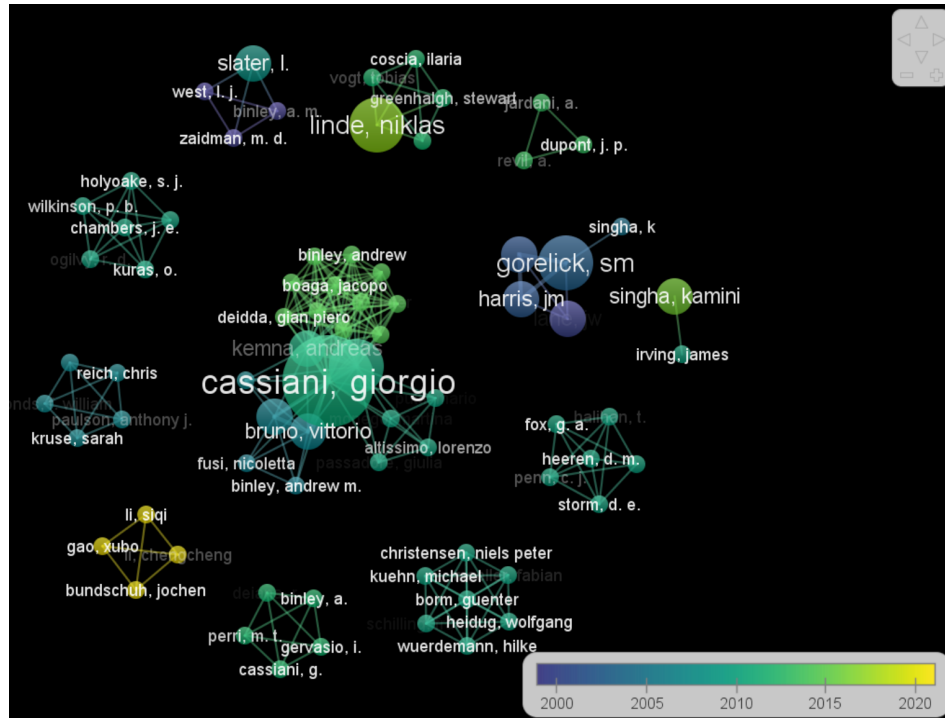


Figura 4: Mapa de Coautoria evidenciando como estão constituídas, distribuídas e estruturadas as redes de pesquisas, além do período predominante de publicação de cada rede. Um número mínimo de 2 documentos por autor e 35 citações mínimas de cada par de artigos foi utilizado para gerar esse mapa (Fonte de dados: Web of Science; Mapa: VOSViewer).

A Figura 5 apresenta o Mapa de Coautoria para a rede de pesquisa mais estruturada e/ou atuante considerando a coautoria como unidade de análise, além da variação temporal de publicação dos artigos. Observa-se que esta rede principal está capitaneada por Cassiani com seus colaboradores distribuídos em 4 núcleos (clusters). O período de publicação da rede compreende 2005 a 2022 com cada núcleo tendo um protagonismo na coautoria centrada nos anos de 2005 com pesquisas (p.ex., Binley et al., 2002; Kemna et al., 2002; Slater et al., 2002; Cassiani et al., 2006; Deiana et al., 2007; Deiana et al., 2008) de 2010 (p.ex., Monego et al., 2010; Camporese et al., 2011), de 2015 (p.ex., Perri et al., 2012; Camporese et al., 2015) e de 2020 (Perri et al., 2018; Perri et al. 2020). As pesquisas desenvolvidas sempre foram focadas na determinação de parâmetros hidrodinâmicos com utilização de ensaios de traçadores com a aplicação de métodos geofísicos, principalmente, tomografia elétrica e secundariamente radar de penetração do solo (GPR).

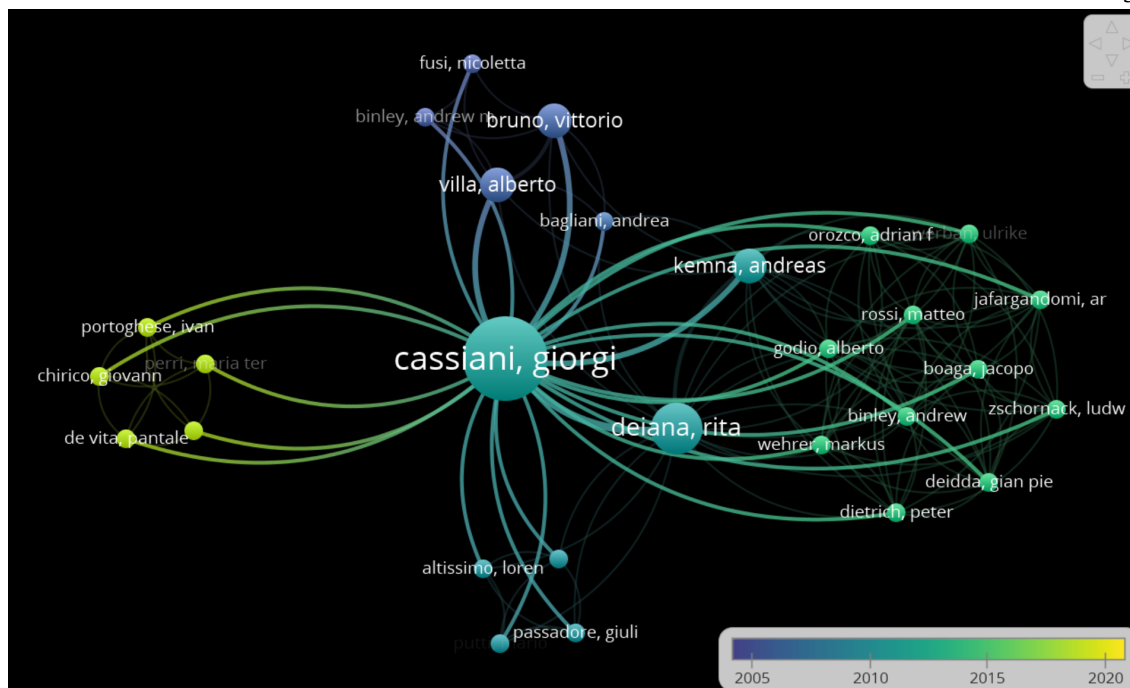


Figura 5: Mapa de coautoria evidenciando a rede de pesquisa mais atuante, a relação entre os diversos coautores e o período de publicação (Fonte: Web of Science). Os condicionantes utilizados para geração deste mapa foram: número mínimo de documentos = 1 e número mínimo de citações = 10. Essa rede é composta por vários clusters conectados a partir dos trabalhos de autoria e coautoria de Cassiani e colaboradores. À esquerda destaca-se o cluster com pesquisadores com os trabalhos mais recentes na temática em questão.

Nesta rede de pesquisa não foram identificados objetivos específicos secundários. O único traçador utilizado nesta rede de pesquisadores foi uma solução salina de Cloreto de Sódio (NaCl), mas em outras pesquisas há registros de uso de Brometo de Sódio (NaBr) (Hung et al., 2021) e Soda Cáustica (NaOH), Ácido Clorídrico (HCl) (Wabo et al., 2004) e água quente (Robert et al., 2019).

Nas pesquisas com outros traçadores que não usaram solução salina de Cloreto de Sódio observam-se resultados mais promissores, principalmente, com uso de água quente (Robert et al., 2019). O arranjo de eletrodos mais utilizado foi o dipolo-dipolo (p.ex., Binley et al., 2002; Kemna et al., 2002; Cassiani et al., 2006; Deiana et al., 2007; Monego et al., 2010; Slater et al., 2002) apesar que nas pesquisas que ocorreram em tanques em laboratório essa informação não consta nos artigos (p.ex., Slater et al., 2002). A ausência dessa informação chama a atenção porque o tipo de arranjo interfere diretamente no cálculo da resistividade e na acurácia dos modelos geoeletricos obtidos.

Cerca de 30% das pesquisas em campo investigaram aquíferos fraturados que apresentam características estruturais (fraturas e falhas) que os classificam como meios heterogêneos em termos de condutores de traçadores (soluções salinas) ou fluxo hídrico subterrâneo (p.ex., Monego et al., 2010; Zouhri & Lutz, 2010; Guo et al., 2011; Robert et al., 2012;

Lv et al., 2019) e cerca de 50% em aquíferos porosos que apresentam características petrofísicas (porosidade e permeabilidade) de meios homogêneos (Camporese et al., 2011; Cassiani et al., 2006; Crestani et al., 2015; Deiana et al., 2007; Guo et al., 2011; Perri et al., 2012; Rasul et al., 2018; Robert et al., 2019; Wilkinson et al., 2010; Yang et al., 2020). Os demais foram realizados em ambientes controlados como laboratórios (p.ex., Slater et al., 2000) ou foram realizadas simulações numéricas (p.ex., Pollock & Cirpka, 2012).

As profundidades médias investigadas com tomografia elétrica é de 20,0m em pesquisas realizadas em campo (Camporese et al., 2011; Cassiani et al., 2006; Crestani et al., 2015; Deiana et al., 2007; Guo et al., 2011; Monego et al., 2010; Perri et al., 2012, 2020; Rasul et al., 2018; Robert et al., 2012). Exceção foram pesquisas que realizaram ensaios com traçadores que investigaram acima de 50,0m (p.ex., Zouhri & Lutz, 2010; Hung et al., 2021).

Uma temática de pesquisa que tem menor impacto em termos de citação, mas, particularmente, muito importante detectada nesta RSL é a que recorre a modelagens e simulações computacionais de dispersão e de condutividade para prever o comportamento da heterogeneidade da condutividade hidráulica a partir de ensaios com traçadores salinos a partir do contraste de resistividade elétrica entre o meio e a infiltração da pluma salina. Pois, nestas simulações é possível dimensionar e otimizar, por exemplo, a quantidade e a resposta teórica de insumos pela avaliação de múltiplos cenários de ensaios, alterando a sensibilidade do modelo por meio da mudança de parâmetros (Epting et al., 2009) prever o comportamento da dispersão (p.ex., Pollock & Cirpka, 2012) e da inversão da tomografia elétrica (p.ex., Vanderborght et al., 2005).

Como principais resultados a partir da extração de dados em geral, foi constatada uma unanimidade de que a utilização de ERT é viável para monitorar a migração de traçadores salinos, considerando a presença de caminhos de fluxo inesperados devido às heterogeneidades que podem afetar as estimativas das propriedades hidráulicas do aquífero (p.ex., Slater et al., 2000; Binley et al., 2002; Kemna et al., 2002; Singha & Gorelick, 2005; Vanderborght et al., 2005; Cassiani et al., 2006; Muller et al., 2010; Kim et al., 2010; Vereecken et al., 2010; Lekmine et al., 2012; Pollock & Cirpka, 2010; Pollock & Cirpka, 2012; Ganz et al., 2014; Rasul et al., 2018; Robinson et al., 2016; Soulsby et al., 2016; Perri et al., 2018; Robert et al., 2019; Hung et al., 2021).

4. CONCLUSÃO

Os artigos revisados evidenciam que o uso de ensaios de traçadores salinos com uso de tomografia elétrica (ERT) constituem uma importante ferramenta de pesquisa para estimar as propriedades hidrodinâmicas de aquíferos porosos e/ou fraturados. Tantos ensaios em laboratório quanto em campo obtiveram excelentes resultados. Antes de ensaios de campo recomenda-se o uso de simulações computacionais para melhor planejamento. A vantagem de realizar soluções numéricas permite um controle maior sobre os parâmetros mais relevantes para a aplicação necessária, permitindo a análise de cenários complexos, contribuindo na melhor compreensão da estrutura do aquífero e ainda há a possibilidade de reconhecer e comparar com os resultados obtidos com a tomografia elétrica simulada e invertida. Desta forma, quando ocorrer a realização do real ensaio em campo haverá melhor compreensão do que a anomalia identificada nas inversões do dado elétrico representa, quais os efeitos que interferem nesta resposta geoeletrica, validando novos modelos ou propondo ajustes e delimitações.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Archie, G. E. (1942). *The Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining Some Reservoir Characteristics*. <http://onepetro.org/TRANS/article-pdf/146/01/54/2179020/spe-942054-g.pdf/1>
- Binley, A., Cassiani, G., Middleton, R., & Winship, P. (2002). Vadose zone flow model parameterisation using cross-borehole radar and resistivity imaging. *Journal of Hydrology*, 147–159. www.elsevier.com/locate/jhydrol
- Camporese, M., Cassiani, G., Deiana, R., & Salandin, P. (2011). Assessment of local hydraulic properties from electrical resistivity tomography monitoring of a three-dimensional synthetic tracer test experiment. *Water Resources Research*, 47(12). <https://doi.org/10.1029/2011WR010528>
- Camporese, M., Cassiani, G., Deiana, R., Salandin, P., & Binley, A. (2015). Coupled and uncoupled hydrogeophysical inversions using ensemble Kalman filter assimilation of ERT-monitored tracer test data. *Water Resources Research*, 51(5), 3277–3291. <https://doi.org/10.1002/2014WR016017>
- Cassiani, G., Bruno, V., Villa, A., Fusi, N., & Binley, A. M. (2006). A saline trace test monitored via time-lapse surface electrical resistivity tomography. *Journal of Applied Geophysics*, 59(3), 244–259. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2005.10.007>
- Castro, K., & Cunha, L. (2021). *Pesquisas forenses e a identificação de vestígios humanos com o Radar de Penetração do Solo (GPR) - Uma Revisão*
- Crestani, E., Camporese, M., & Salandin, P. (2015). Assessment of hydraulic conductivity distributions through assimilation of travel time data from ERT-monitored tracer tests. *Advances in Water Resources*, 84, 23–36. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2015.07.022>
- Deiana, R., Cassiani, G., Kemna, A., Villa, A., Bruno, V., & Bagliani, A. (2007). An experiment of non-invasive characterization of the vadose zone via water injection and cross-hole time-lapse

geophysical monitoring. *Near Surface Geophysics*, 5(3), 183–194. <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2006030>

- Deiana, R., Cassiani, G., Villa, A., Bagliani, A., & Bruno, V. (2008). Calibration of a Vadose Zone Model Using Water Injection Monitored by GPR and Electrical Resistance Tomography. *Vadose Zone Journal*, 7(1), 215–226. <https://doi.org/10.2136/vzj2006.0137>
- Epting, J., Romanov, D., Huggenberger, P., & Kaufmann, G. (2009). Hydrology and Earth System Sciences Integrating field and numerical modeling methods for applied urban karst hydrogeology. In *Hydrol. Earth Syst. Sci* (Vol. 13). www.hydrol-earth-syst-sci.net/13/1163/2009/
- Ganz, C., Bachmann, J., Noell, U., Duijnisveld, W. H. M., & Lamparter, A. (2014). Hydraulic Modeling and in situ Electrical Resistivity Tomography to Analyze Pondered Infiltration into a Water Repellent Sand. *Vadose Zone Journal*, 13(1), 1–14. <https://doi.org/10.2136/vzj2013.04.0074>
- Guo, T. R., Tong, L. T., Chiang, L. W., & Yang, C. H. (2011). A fracture study by using bipole-bipole cross-well logging. *Journal of Applied Geophysics*, 75(2), 203–210. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2011.07.012>
- Hung, Y. C., Chen, T. T., Tsai, T. F., & Chen, H. X. (2021). A comprehensive investigation on abnormal impoundment of reservoirs—a case study of qionglin reservoir in Kinmen Island. *Water (Switzerland)*, 13(11). <https://doi.org/10.3390/w13111463>
- Kemna, A., Vanderborght, J., Kulesa, B., & Vereecken, H. (2002). Imaging and characterisation of subsurface solute transport using electrical resistivity tomography (ERT) and equivalent transport models. *Journal of Hydrology*, 1, 125–146. www.elsevier.com/locate/jhydrol
- Kim, J. G., Park, S. G., Yi, M. J., & Kim, J. H. (2010). Tracing solute infiltration using a combined method of dye tracer test and electrical resistivity tomography in an undisturbed forest soil profile. *Hydrological Processes*, 24(21), 2977–2982. <https://doi.org/10.1002/hyp.7711>
- Kuras, O., Pritchard, J. D., Meldrum, P. I., Chambers, J. E., Wilkinson, P. B., Ogilvy, R. D., & Wealhall, G. P. (2009). Monitoring hydraulic processes with automated time-lapse electrical resistivity tomography (ALERT). *Comptes Rendus - Geoscience*, 341(10–11), 868–885. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2009.07.010>
- Lekmine, G., Pessel, M., & Auradou, H. (2012). Experimental Study of ERT Monitoring Ability to Measure Solute Dispersion. *Ground Water*, 50(2), 285–295. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2011.00837.x>
- Lv, H., Ling, C., Hu, B. X., Ran, J., Zheng, Y., Xu, Q., & Tong, J. (2019). Characterizing groundwater flow in a translational rock landslide of southwestern China. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78(3), 1989–2007. <https://doi.org/10.1007/s10064-017-1212-3>
- Martel, R., Castellazzi, P., Gloaguen, E., Trépanier, L., & Garfias, J. (2018). ERT, GPR, InSAR, and tracer tests to characterize karst aquifer systems under urban areas: The case of Quebec City. *Geomorphology*, 310, 45–56. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.03.003>
- Monego, M., Cassiani, G., Deiana, R., Putti, M., Passadore, G., & Altissimo, L. (2010). A tracer test in a shallow heterogeneous aquifer monitored via time-lapse surface electrical resistivity tomography. *Geophysics*, 75(4). <https://doi.org/10.1190/1.3474601>
- Muller, K., Vanderborght, J., Englert, A., Kemna, A., Huisman, J. A., Rings, J., & Vereecken, H. (2010). Imaging and characterization of solute transport during two tracer tests in a shallow aquifer using electrical resistivity tomography and multilevel groundwater samplers. *Water Resources Research*, 46(3). <https://doi.org/10.1029/2008WR007595>

- Perri, M. T., Barone, I., Cassiani, G., Deiana, R., & Binley, A. (2020). Borehole effect causing artefacts in cross-borehole electrical resistivity tomography: A hydraulic fracturing case study. *Near Surface Geophysics*, 18(4), 445–462. <https://doi.org/10.1002/nsg.12111>
- Perri, M. T., Cassiani, G., Gervasio, I., Deiana, R., & Binley, A. (2012). A saline tracer test monitored via both surface and cross-borehole electrical resistivity tomography: Comparison of time-lapse results. *Journal of Applied Geophysics*, 79, 6–16. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2011.12.011>
- Perri, M. T., De Vita, P., Masciale, R., Portoghese, I., Chirico, G. B., & Cassiani, G. (2018). Time-lapse Mise-à-la-Masse measurements and modeling for tracer test monitoring in a shallow aquifer. *Journal of Hydrology*, 561, 461–477. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.11.013>
- Pollock, D., & Cirpka, O. A. (2008). Temporal moments in geoelectrical monitoring of salt tracer experiments. *Water Resources Research*, 44(12). <https://doi.org/10.1029/2008WR007014>
- Pollock, D., & Cirpka, O. A. (2010). Fully coupled hydrogeophysical inversion of synthetic salt tracer experiments. *Water Resources Research*, 46(7). <https://doi.org/10.1029/2009WR008575>
- Pollock, D., & Cirpka, O. A. (2012). Fully coupled hydrogeophysical inversion of a laboratory salt tracer experiment monitored by electrical resistivity tomography. *Water Resources Research*, 48(1). <https://doi.org/10.1029/2011WR010779>
- Porritt, K., Gomersall, J., & Lockwood, C. (2014). *SYSTEMATIC REVIEWS, Step by Step Study Selection and Critical Appraisal* (Vol. 114, Issue 6). <http://bit>
- Rasul, H., Earon, R., & Olofsson, B. (2018). Detecting Seasonal Flow Pathways in Road Structures Using Tracer Tests and ERT. *Water, Air, and Soil Pollution*, 229(11). <https://doi.org/10.1007/s11270-018-4008-6>
- Robert, T., Caterina, D., Deceuster, J., Kaufmann, O., & Nguyen, F. (2012). A salt tracer test monitored with surface ERT to detect preferential flow and transport paths in fractured/karstified limestones. *Geophysics*, 77(2). <https://doi.org/10.1190/geo2011-0313.1>
- Robert, T., Paulus, C., Bolly, P. Y., Lin, E. K. S., & Hermans, T. (2019). Heat as a proxy to image dynamic processes with 4D electrical resistivity tomography. *Geosciences (Switzerland)*, 9(10). <https://doi.org/10.3390/geosciences9100414>
- Robinson, J., Slater, L., Johnson, T., Shapiro, A., Tiedeman, C., Ntarlagiannis, D., Johnson, C., Day-Lewis, F., Lacombe, P., Imbrigiotta, T., & Lane, J. (2016). Imaging Pathways in Fractured Rock Using Three-Dimensional Electrical Resistivity Tomography. *Groundwater*, 54(2), 186–201. <https://doi.org/10.1111/gwat.12356>
- Singha, K., & Gorelick, S. M. (2005). Saline tracer visualized with three-dimensional electrical resistivity tomography: Field-scale spatial moment analysis. *Water Resources Research*, 41(5), 1–17. <https://doi.org/10.1029/2004WR003460>
- Slater, L., Binley, A., Daily, W., & Johnson, R. (2000). Cross-hole electrical imaging of a controlled saline tracer injection. In *Journal of Applied Geophysics* (Vol. 44). www.elsevier.nl/locate/jappgeo
- Slater, L., Binley, A., Versteeg, R., Cassiani, G., Birken, R., & Sandberg, S. (2002). A 3D ERT study of solute transport in a large experimental tank. In *Journal of Applied Geophysics* (Vol. 49). www.elsevier.com/locate/jappgeo
- Soulsby, C., Bradford, J., Dick, J., McNamara, J. P., Geris, J., Lessels, J., Blumstock, M., & Tetzlaff, D. (2016). Using geophysical surveys to test tracer-based storage estimates in headwater catchments. *Hydrological Processes*, 30(23), 4434–4445. <https://doi.org/10.1002/hyp.10889>

- Vanderborght, J., Kemna, A., Hardelauf, H., & Vereecken, H. (2005). Potential of electrical resistivity tomography to infer aquifer transport characteristics from tracer studies: A synthetic case study. *Water Resources Research*, 41(6), 1–23. <https://doi.org/10.1029/2004WR003774>
- Vereecken, H., Kemna, A., Tillmann, A., Vanderborght, J., & Verweerd, A. (2010). *Hydrogeophysical characterization of subsurface solute transport at the Krauthausen test site: experiments and numerical modelling*.
- Wabo, E., Kagoshima, M., & Mann, R. (2004). *BATCH STIRRED VESSEL MIXING EVALUATED BY VISUALIZED REACTIVE TRACERS AND ELECTRICAL TOMOGRAPHY*.
- Waltman, L., van Eck, N. J., & Noyons, E. C. M. (2010). A unified approach to mapping and clustering of bibliometric networks. *Journal of Informetrics*, 4(4), 629–635. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2010.07.002>
- Wilkinson, P. B., Meldrum, P. I., Kuras, O., Chambers, J. E., Holyoake, S. J., & Ogilvy, R. D. (2010). High-resolution Electrical Resistivity Tomography monitoring of a tracer test in a confined aquifer. *Journal of Applied Geophysics*, 70(4), 268–276. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2009.08.001>
- Yang, Z., Deng, Y., Qian, J., Ding, R., & Ma, L. (2020). *Characterizing temporal behavior of a thermal tracer in porous media by time-lapse electrical resistivity measurements*. <https://doi.org/10.1007/s10040-021-02307-1>/Published
- Zakarewicz, G., Maciel, S. T. R., & da Cunha, L. S. (2024). Systematic literature review on seismic diffraction imaging. In *Earth-Science Reviews* (Vol. 254). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2024.104792>
- Zouhri, L., & Lutz, P. (2010). A comparison of peak and plate electrodes in electrical resistivity tomography: Application to the chalky groundwater of the Beauvais aquifer (northern part of the Paris basin, France). *Hydrological Processes*, 24(21), 3040–3052. <https://doi.org/10.1002/hyp.7719>

CAPÍTULO 4 – ARTIGO CIENTÍFICO 2

*Artigo a ser submetido à revista Brazilian Journal of Geophysics, após a incorporação das sugestões e correções indicadas pela banca examinadora.

Aplicabilidade de simulação 2D de um ensaio de traçador salino acoplado à tomografia elétrica para determinação de parâmetros hidrodinâmicos de um aquífero.

Guilherme de Azambuja Villanova¹, Luciano Soares da Cunha¹

¹ Universidade de Brasília, Instituto de Geociências

RESUMO

Com intenção de investigar a aplicabilidade de uma simulação numérica de um ensaio de traçador salino acoplado à tomografia elétrica (ERT) para determinar parâmetros hidrodinâmicos de um aquífero no bioma Cerrado. Compreender estes parâmetros no contexto das mudanças climáticas e da disponibilidade de água, é crucial para uma gestão eficaz dos recursos hídricos. O monitoramento tradicional de aquíferos é custoso; assim, métodos alternativos, como ensaios com traçadores salinos combinados com levantamentos geofísicos, são empregados.

Recorrendo à biblioteca pyGimli para modelar o transporte e a dispersão da pluma salina, uma situação geológica simplificada do aquífero com três camadas planas foi simulada. A condutividade hidráulica e dispersividade, foram derivados de ensaios e revisões sistemáticas. A simulação da injeção do traçador em múltiplos pontos, e o comportamento resultante da pluma foram visualizados ao longo do tempo. Os dados de ERT foram sintetizados com base nas mudanças de resistividade associadas à dispersão salina, permitindo a geração de seções sintéticas de ERT que refletem o movimento da pluma através do aquífero.

Os resultados indicam que o modelo numérico captura a dinâmica do transporte salino, fornecendo *insights* sobre a influência das propriedades hidráulicas no comportamento da pluma. Contribuindo para uma compreensão mais profunda dos processos de fluxo subsuperficial e estabelecem as bases para futuros estudos voltados à otimização das estratégias de gestão dos recursos hídricos diante das mudanças climáticas.

Palavras-Chave: Traçador Salino, Simulação Numérica 2D, Tomografia Elétrica, Hidrogeologia.

ABSTRACT

With the intention of investigating the applicability of a numerical simulation of a saline tracer test coupled with electrical resistivity tomography (ERT) to determine hydrodynamic parameters of an aquifer in the Cerrado biome, understanding these parameters in the context of climate change and water availability is crucial for effective water resource management. Traditional monitoring of aquifers is costly; thus, alternative methods, such as saline tracer tests combined with geophysical surveys, are employed.

Utilizing the pyGimli Python package to model the transport and dispersion of the saline plume, a simplified geological scenario of the aquifer with three flat layers was simulated. Hydraulic conductivity and dispersivity were derived from experiments and systematic reviews. The simulation involved the injection of the tracer at multiple points, and the resulting behavior of the plume was visualized over time. The ERT data were synthesized based on the resistivity changes associated with saline dispersion, allowing for the generation of synthetic ERT sections that reflect the movement of the plume through the aquifer.

Results shows that the numerical model capture the dynamics of saline transport, providing insights into the influence of hydraulic properties on plume behavior. This contributes to a deeper understanding of subsurface flow processes and lays the groundwork for future studies aimed at optimizing water resource management strategies in the face of climate change.

Keywords: Saline Tracers, 2D Numerical Simulation, ERT, Hydrogeophysics, Groundwater Monitoring.

1. INTRODUÇÃO

O conhecimento e a previsão de como ocorrem os fluxos hídricos, e como poderão ser alterados, em processos associados à infiltração e percolação de água em solos do bioma Cerrado, no contexto de representatividade de disponibilidade hídrica e em mudanças climáticas, são muito importantes (National Research Council, 2001; IBGE, 2019; Overbeck et al., 2022). Para melhor previsão de futuras ocorrências, são utilizados programas e *scripts* para realizar modelagens hídricas. A acurácia de um modelo de fluxo hídrico subterrâneo é diretamente dependente das estimativas dos parâmetros hidrodinâmicos, principalmente, a condutividade hidráulica.

Monitorar um aquífero e sua influência em grandes dimensões, não é prático ou econômico. O processo exigiria executar inúmeras medidas em campo ou em laboratório que aumentem a precisão dos valores medidos. Uma alternativa para os métodos tradicionais, é a realização de ensaios com traçadores salinos acompanhados de levantamentos geofísicos de tomografia elétrica (p.ex., Cassiani et al., 2006; Deiana et al., 2007; Monego et al., 2010; Zouhri & Lutz, 2010). Nesses ensaios em poços de injeção, uma solução salina de concentração conhecida é introduzida no meio (solo) enquanto uma seção geoeletrica é adquirida em períodos pré-determinados. Após o pré-processamento e processamento dos dados de campo são obtidas estimativas dos parâmetros que influenciam no fluxo de água subterrânea, principalmente, em meios não-saturados (Deiana et al., 2008; Monego et al., 2010; Camporese et al., 2011, Camporese et al., 2015; Perri et al., 2012; Perri et al., 2018 Perri et al., 2020).

Antes da execução em campo, é possível e recomendável o uso de simulações computacionais de ensaios de dispersão de um traçador salino para estimar a de condutividade hidráulica. Nesse ambiente simulado é possível avaliar a influência da heterogeneidade da condutividade hidráulica, o contraste de resistividade, acompanhar o comportamento da infiltração da pluma salina (Vanderborght et al., 2005; Crestani et al., 2015). Além disso, avaliar múltiplos cenários, alterar a sensibilidade do modelo por meio da mudança de parâmetros (Pollock & Cirpka, 2008; Kim et al., 2010; Pollock & Cirpka, 2010) e da inversão da tomografia elétrica (Singha & Gorelick, 2005; Muller et al., 2010).

Uma das formas de aumentar a acurácia de um modelo de fluxo subterrâneo, principalmente, em meios heterogêneos é aumentar a complexidade do sistema (Pollock & Cirpka, 2008; Pollock & Cirpka, 2010; Pollock & Cirpka, 2012). Os modelos analíticos dependem do conhecimento dos parâmetros do meio, pois os modelos obtidos podem conter elevado grau de ambiguidade e incertezas (Pollock & Cirpka, 2012; Crestani et al., 2015; Robinson et al., 2016).

A estimativa de parâmetros hidrodinâmicos como a condutividade hidráulica utilizando plumas salinas acoplada à tomografia elétrica utilizando modelagens e simulações computacionais é um bom caminho a seguir, principalmente, quando as informações da geometria do aquífero (fraturas e demais heterogeneidades) são escassas (Kim et al., 2010; Pollock & Cirpka, 2010). Essas simulações auxiliam na delimitação dos parâmetros do modelo de fluxo e transporte e predição das respostas do meio hipotéticas, naturais e antropogênicas (Sreeparvathy et al., 2018). A simulação numérica atinge boa resolução, limitando-se à representatividade da equação governante, da malha de resolução do modelo a fidedignidade dos parâmetros, e os limites computacionais (Slater et al., 2000).

Desta forma, o presente trabalho visa avaliar a aplicabilidade de uma simulação 2D de um ensaio de traçador salino acoplado à tomografia elétrica para determinação de parâmetros hidrodinâmicos de um aquífero.

2. MATERIAIS

Neste tipo de simulação 2D é construído um modelo geométrico que representa os aquíferos existentes, é inserido os parâmetros hidrodinâmicos dos aquíferos e do traçador salino. Com o resultado do avanço da pluma salina fluindo no meio, é calculada uma seção sintética de tomografia elétrica do meio a partir da resistividade elétrica calculada da pluma salina. Desta forma, é possível avaliar antecipadamente o comportamento esperado em um ensaio de campo utilizando traçador salino.

2.1. Representação física do modelo

Os parâmetros e a representação física do modelo utilizados na simulação 2D realizada neste estudo tem basicamente duas fontes de dados: 1º) ensaio de traçador salino realizado na Fazenda Experimental da Universidade de Brasília em agosto de 2024; 2º) artigos científicos obtidos em uma Revisão Sistemática de Literatura (Villanova & Cunha, 2025).

Do ensaio de campo foram utilizados a geometria geral do meio (tipos de aquíferos), espessura média do solo (>10 m) e com embasamento fraturado, injeção do traçador salino por 8 furos para injeção sendo espaçados a cada 5,0 m e centrados 04 furos para cada lado a partir do ponto central considerado, cada poço com 1,0 m de profundidade e 0,2 m de diâmetro, a condutividade elétrica da solução salina foi de 28 mS/cm. Durante o ensaio em campo foram executadas medidas de tomografia elétrica, sendo o centro do perfil coincidente o posicionamento central dos furos. A configuração dos eletrodos realizada, dividiu os eletrodos do sistema em dois pares próximos, um de potencial(P1,P2) de comprimento 10,0 m e outro par de corrente(C1,C2) também com uma distância de 10,0 m. Estes pares são distanciados em múltiplos de 10,0 m para atingir maiores níveis de profundidades. O arranjo dipolo-dipolo com 10,0 m de espaçamento foi utilizado em um comprimento total de 560,0 m de perfil. Ocorreram repetições das leituras de tomografia de resistividade elétrica a cada 30 min. Estes perfis adquiridos, são pretendidos de ser mostrados em um trabalho futuro, específico para a análise dos fluxos.

Dos artigos científicos analisados e dados experimentais foram obtidos estimativas dos parâmetros concentração salina (30 g/litro), condutividade específica do NaCl (0,19330 S/m / g/litro), coeficiente de cimentação (1,1), coeficiente de dispersão (0.9), volume salino de injeção (3960 litros).

A Figura 1 apresenta a configuração das simulações hídricas realizadas, em um gráfico representando o comprimento e a profundidade em metro, ilustrando o posicionamento das camadas de solos utilizadas na simulação 2D e o posicionamento dos poços teóricos de injeção do traçador salino. Neste modelo foram utilizadas três camadas a partir da superfície, representando o solo úmido (azul) com espessura de 2,0 m, a segunda camada representa um solo mais seco (cinza) com 8,0 m de espessura e a última camada representa um ritmito fraturado a qual o limite inferior foi definido como 34,0 m em cor amarela. Os oito poços de injeção estão inseridos na área superior central da primeira camada. Os números de *Region Markers* representam o código de identificação da camada para o software.

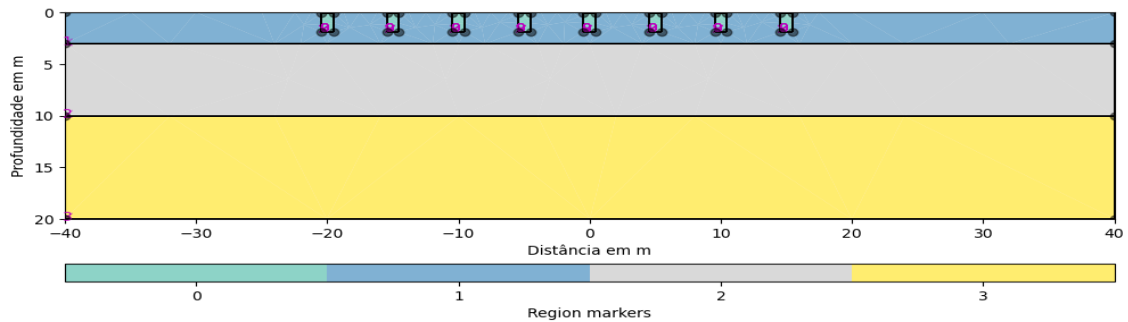


Figura 01 – Exemplo de visualização da saída gráfica, da definição de geometrias e marcadores para as condições de contorno do modelo. O modelo apresenta três camadas a partir da superfície, representando o solo úmido (azul) com espessura de 2,0 m, a segunda camada representa solo seco (cinza) com 8,0 m de espessura e a última camada com 24,0 m de espessura, representa um rítmico fraturado. Os oito poços de injeção salina estão inseridos na 1ª camada.

2.2. Nível de representação das equações governantes

As equações diferenciais, representantes do problema, foram resolvidas por meio de métodos numéricos (Pollock & Cirpka, 2012), elementos finitos e volumes finitos, de funções de biblioteca livre, voltada para modelagem e inversão geofísica.

Uma consideração de simplificação foi utilizada para o cálculo do potencial do gradiente hidráulico definindo-o como constante. As condições de contorno tiveram valores arbitrários, sendo unitário para o limite superior e zero para o limite inferior da malha de resolução. Por fim, foi utilizado uma injeção constante de solução salina no interior dos poços de injeção.

2.3. Parâmetros da simulação

A Tabela 01 apresenta os parâmetros espaciais do modelo e do experimento utilizados na simulação. Os parâmetros espaciais do modelo foram utilizados para discretizar a área de interesse para a simulação poder ser realizada computacionalmente por uma fina malha de células, permitindo uma resolução maior e mais contínua do problema. Por outro lado, quanto mais fina a malha, maior o tempo de processamento. Os parâmetros espaciais do experimento foram utilizados para caracterizar as dimensões onde as células devem se comportar como homogêneas e iterar entre outras células, além de definir espaços específicos para a definição de condições iniciais e de contorno.

Os parâmetros hidráulicos definem propriedades de movimentação dos fluidos para correlação com a lei de Darcy, ou seja, os valores que serão iterados entre as células (Tabela 01).

No caso dos parâmetros resistivos definem o acoplamento da concentração salina na célula, com a resistividade do meio, a partir da lei de Archie (Archie, 1942), que relaciona a resistividade do meio com a condutividade específica do fluido (Tabela 01).

Os parâmetros do experimento definem o campo de medição indireta da resistividade do meio. Limitando a resolução elétrica, e a profundidade de investigação (Tabela 01).

A discretização temporal necessária para a visualização da previsão de movimentação da pluma, seja no modelo de dispersão de soluto injetado e/ou na simulação elétrica no mesmo instante, caso assim deseje (Tabela 01).

Tabela 1: Parâmetros espaciais do modelo, do experimento, parâmetros hidráulicos e de resistividade elétrica utilizados na simulação.

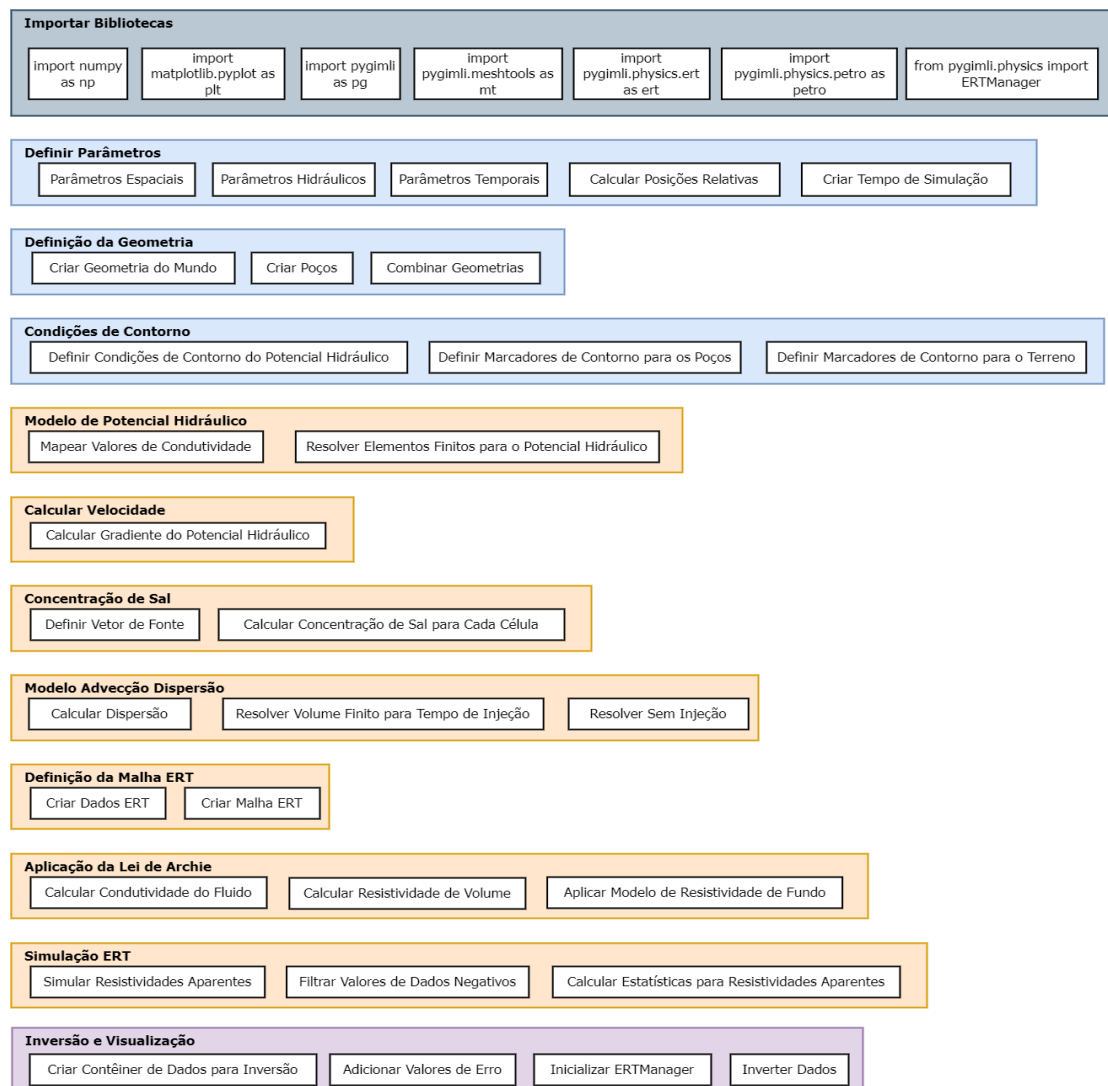
Categoria		Especificação
Linguagem de programação		Python 3.10.16
Especificações do computador		24 GB RAM; i7-9750H
Gerenciador de pacotes		Anaconda 24.11.3
Bibliotecas		pyGimli 1.5.3
Espaciais - Modelo	Valores	Unidade
Limites cartesianos nas Ordenadas	(-40, 40)	m
Limites cartesianos nas Abcissas	(0.01, -20)	m
Área mínima da célula	0.4	m ²
Qualidade da malha	10	-
Espaciais - Experimento	Valores	Unidade
Posição dos poços	[-20, -15, -10, -5, 0, 5, 10, 15]	m
Altura, profundidade, raio do poço	(-0.1, -0.9, 0.175)	m
Profundidade das camadas	(* , -2, -8, -24)	m
Hidráulicos	Valores	Unidade
Condutividade hidráulica das camadas	(1e3, 1.4e1, 1.2e1, 3.5e1)	m/s
Coeficiente de dispersão	0.9	m ²
Porosidade	0.3	-
Resistivos	Valores	Unidade
Condutividade específica (NaCl)	= 0.19330*c-0.00031	S/m
Concentração inicial (c)	13.27	g/litro
Resistividade da água	10000	ohm m
Resistividade do meio	(300, 150, 4464, 3300)	ohm m
Coeficiente de cimentação	1.1**	-
Experimento ERT	Valores	Unidade
Comprimento	600	m
Espaçamento	10	m
n.º eletrodos	60	-
Arranjo eletródico	DD	-

3. MÉTODOS

O código (disponível para averiguação no repositório pessoal do GitHub: <https://github.com/guigeof/TF>) utilizado representa uma série de adaptações atribuídas a um fluxo de acoplamento hidrogeofísico descrito por (Wagner et al., 2017) que propõe um código para reprodução de inversões diretas hidrogeofísicas com o uso da biblioteca Python pyGimli (Rücker et al., 2017), base para o software BERT (Günther et al., 2006) a partir de uma dispersão lateral de uma fonte pontual em um fluxo hídrico subterrâneo. Este código simula a movimentação de múltiplas fontes salinas volumétricas na superfície com o intuito de guiar e comparar com uma situação real e auxiliar na previsão do fluxo de um aquífero poroso para outro fraturado.

O Quadro 1 apresenta as quatro etapas realizadas durante a implementação do código. A etapa 1 (encontrada no primeiro fluxo, de cima para baixo, em cor cinza) refere-se à seção de dependências, a etapa 2 (2º, 3º e 4º fluxo, de cor azul-celeste) aos modelos de geometria, etapa 3 (quinto ao penúltimo fluxo, em amarelo) mostrando passos necessários para exibição dos resultados obtidos por meio de corolários e soluções para as equações diferenciais parciais do modelo e etapa 4 (último fluxo de cor rosada) que compreende de inversão dos dados, a qual permite a verificação do erro quadrático médio, como medida de precisão da inversão geofísica mais o acoplamento entre o traçador, condutividade e geometria do modelo.

Quadro 1: Etapas da implementação do código a partir do trabalho de (Wagner et al., 2017) utilizado na simulação 2D de um ensaio de um traçador salino.



3.1. Implementação do código

Para a implementação do código foram utilizadas as bibliotecas pyGimli, NumPy e Matplotlib que oferecem suporte robusto para APIs de soluções de metodologias geofísicas, resolução de cálculos numéricos e visualizações gráficas, pré-definidas, facilitando o processo de implementação. Delimitações nos parâmetros foram realizadas para representar melhor as heterogeneidades do meio.

Primeiro é definida a geometria do modelo e as respectivas condições de contorno, homogeneidade e considerações que permitem definir indiretamente a precisão e a eficácia das simulações, influenciando diretamente na qualidade dos resultados obtidos e nas interpretações geofísicas. Após essas definições, é realizada uma plotagem para validação das áreas admitidas (Figura 01).

A seguir, são definidos os valores de entrada de condutividade hidráulica (K) os quais são compilados célula a célula em uma malha poligonal irregular (Figura 02a), que representa a discretização do espaço geométrico de simulação. Depois, é realizado o cálculo do potencial hidráulico (p) utilizando os valores de K a partir da equação de Darcy aplicados a uma condição específica onde a velocidade é zero. Utilizando a função Solve Finite Elements (Quadro 02) que necessita de condições de contorno para resolução (bc=pBound).

Quadro 2: Equação de Darcy e função Solve Finite Elements.

Equação de Darcy
$v = K \cdot \nabla p$
Função Solve Finite Elements.
$p = \text{pg.solver.solveFiniteElements}(\text{mesh}, a=K, bc=pBound)$

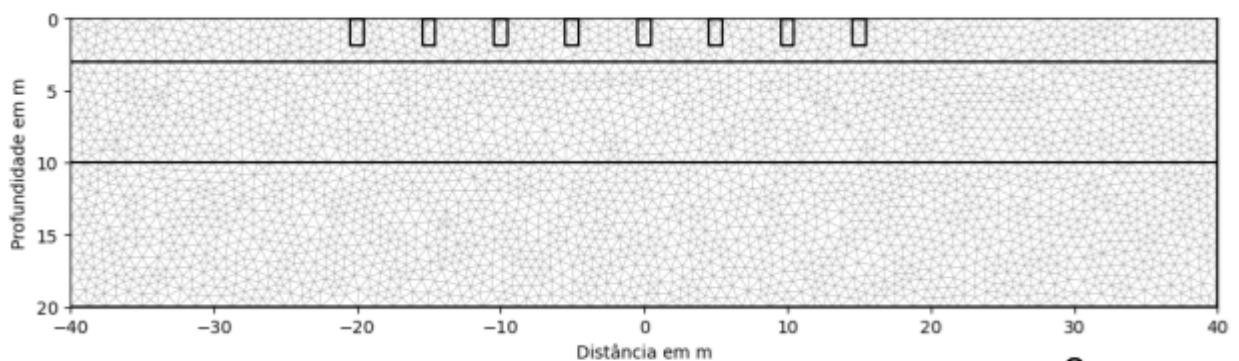
Mais cálculos foram necessários até atingir a relação das plumas com a resistividade elétrica.

3.2. Velocidade

A velocidade da pluma foi estimada a partir do cálculo pela equação de Darcy, mas dessa vez com o valor do potencial hidráulico (p) conhecido pela aplicação da condição de divergência da velocidade ser igual a zero. Refazendo esse cálculo, sem a condição de continuidade, foi obtido os vetores de velocidade e as linhas de fluxo. As linhas de fluxo representam a direção do movimento do fluido no meio, permitindo uma análise detalhada do comportamento hidráulico no sistema modelado (Figura 02 e Quadro 03).

Quadro 3: Função utilizada para calcular a velocidade com base na lei de Darcy

$\text{vel} = (-\text{pg.solver.grad}(\text{mesh}, p) * \text{np.asarray}([K, K, K])).T$
--



2 a

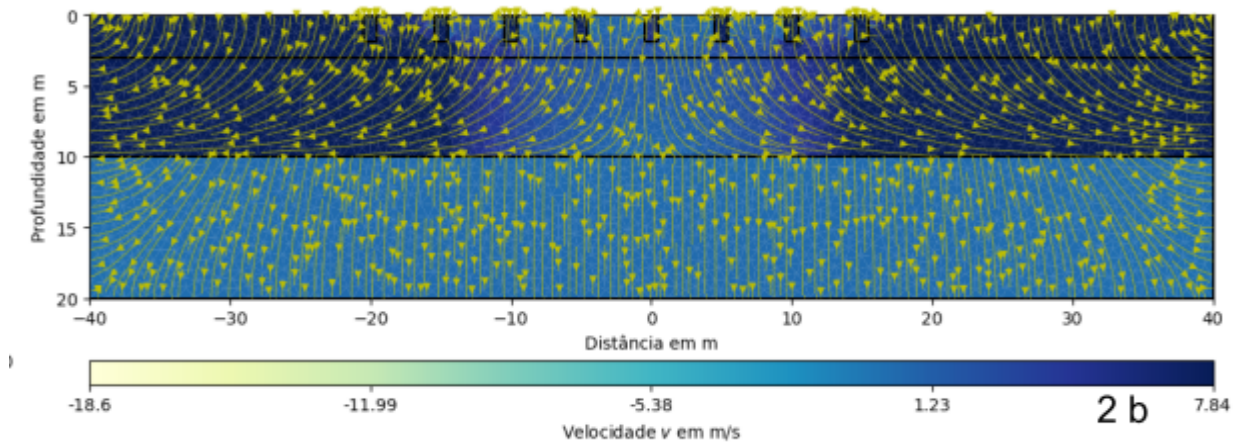


Figura 02: a) Malha das células gerada através da biblioteca para cálculos de elementos e volumes finitos. b) Modelo de solução para o vetor das velocidades de dispersão da pluma a partir do cálculo do gradiente do potencial hidráulico. Curioso observar que na área central, a velocidade estimada da pluma é menor que as áreas nos extremos, gerando um “engarrafamento” do fluxo.

Após a obtenção da direção de movimentação do fluxo, a concentração salina em g/L é distribuída em cada célula interna do poço até o preenchimento total. Não foi encontrada uma forma de utilizar uma função já definida pelas bibliotecas, portanto uma interação de um loop em cadeia, foi necessária para o preenchimento dos valores. A função de definir toda a área do poço como uma só célula não foi utilizada, com a premissa de futuramente utilizar uma taxa de infiltração lateral dependente da altura do modelo. Pela aleatoriedade da malha, o valor de concentração em cada célula, fica dependente da área ocupada por cada uma. Com o preenchimento dos poços, é iniciado o cálculo para solução da equação diferencial parcial que define o modelo de dispersão e advecção de fluidos.

3.3. Modelo dispersão e advecção

Diversos são os modelos e equações que descrevem a concentração nos fluidos. O modelo de advecção e dispersão utilizado foi o proposto por (Pollock & Cirpka, 2010) sendo mais simples, pois, não considera, por exemplo, a interação do fluido com argilominerais (Quadro 4).

Quadro 4: Equação do modelo de advecção dispersão de solutos implementado a partir de (Pollock & Cirpka, 2010). A dispersão calcula o espalhamento aleatório da concentração (c) a depender do coeficiente de dispersão(D). A advecção calcula o transporte do material a depender do vetor velocidade(v). A injeção inicial define fontes e sumidouros do material. Abaixo da equação, está a forma a qual se deve correlacionar os termos da equação no modelo de resolução pré-definido no pyGIMLI.

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \underbrace{\nabla \cdot (D \nabla c)}_{\text{Difusão / Dispersão}} - \underbrace{\nabla \cdot (\mathbf{v} \nabla c)}_{\text{Advecção}} + \text{Injeção inicial}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \nabla \cdot (a \nabla u) [-\mathbf{v} \cdot \nabla u + bu] + f(\mathbf{r}, t)$$

$$u(\mathbf{r}, t) = u_B \quad \mathbf{r} \in \Gamma_{\text{Dirichlet}}$$

$$\frac{\partial u(\mathbf{r}, t)}{\partial \mathbf{n}} = u_{\partial B} \quad \mathbf{r} \in \Gamma_{\text{Neumann}}$$

$$u(\mathbf{r}, t = 0) = u_0 \quad \text{com} \quad \mathbf{r} \in \Omega$$

O resultado da simulação da dispersão da pluma para a execução do código são mostrados abaixo (figura 03) em uma sequência temporal em um intervalo das primeiras 4 horas, espaçada em escala logarítmica.

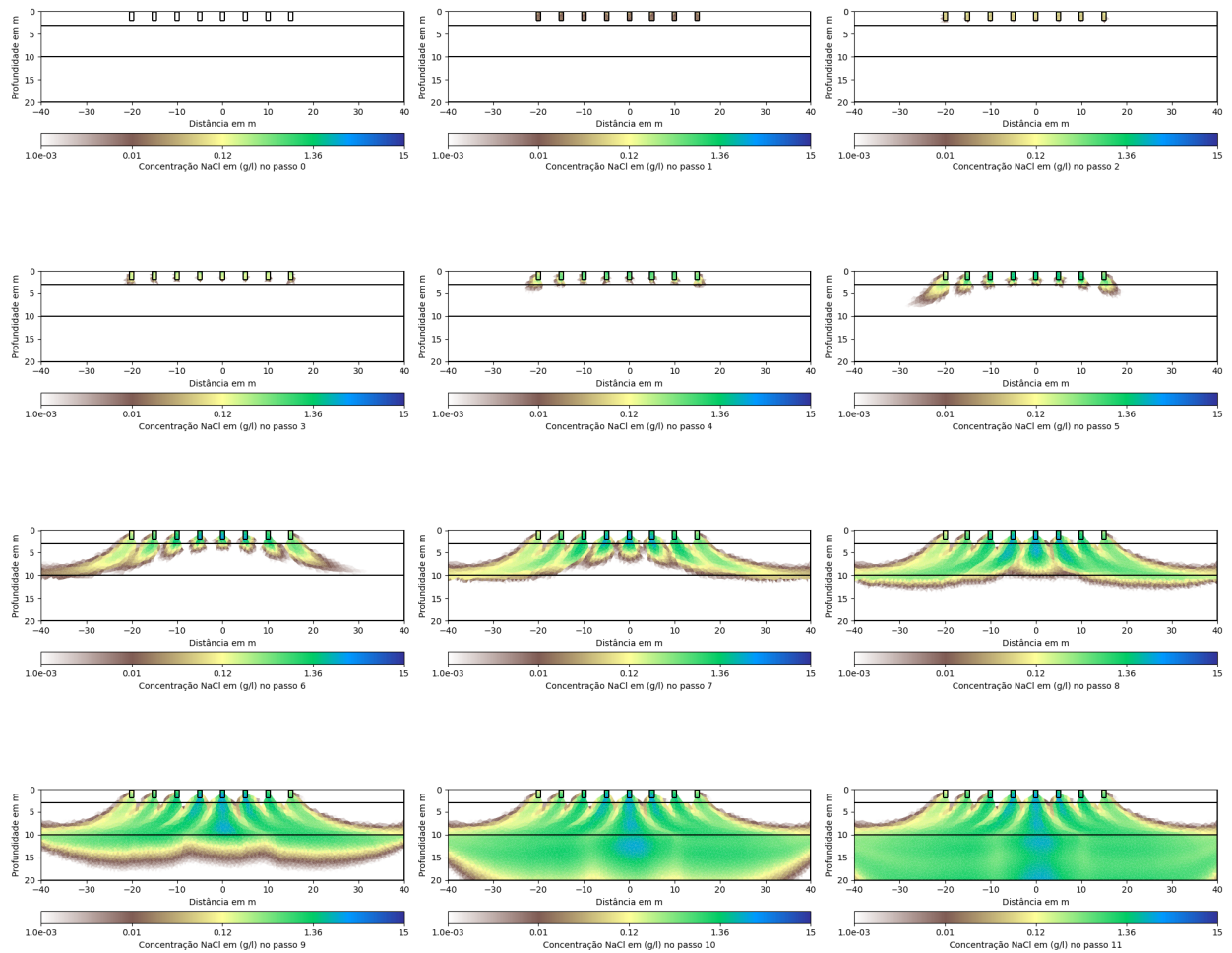


Figura 03: Gráficos gerados após a simulação ERT com base nos dados de concentração salina em um determinado passo de tempo. Tempo de resolução da simulação para os parâmetros definidos em torno de 30min.

3.4. Malha e simulação da seção de tomografia elétrica

A seguir com as funções disponíveis na biblioteca, foi definida a malha da aquisição de medidas de resistividade elétrica, definida como uma pequena parte (600 m centrais em preto), da malha total gerada (10 vezes maior), distância qual tem objetivos de minimizar os efeitos de borda da simulação numérica (Figura 05).

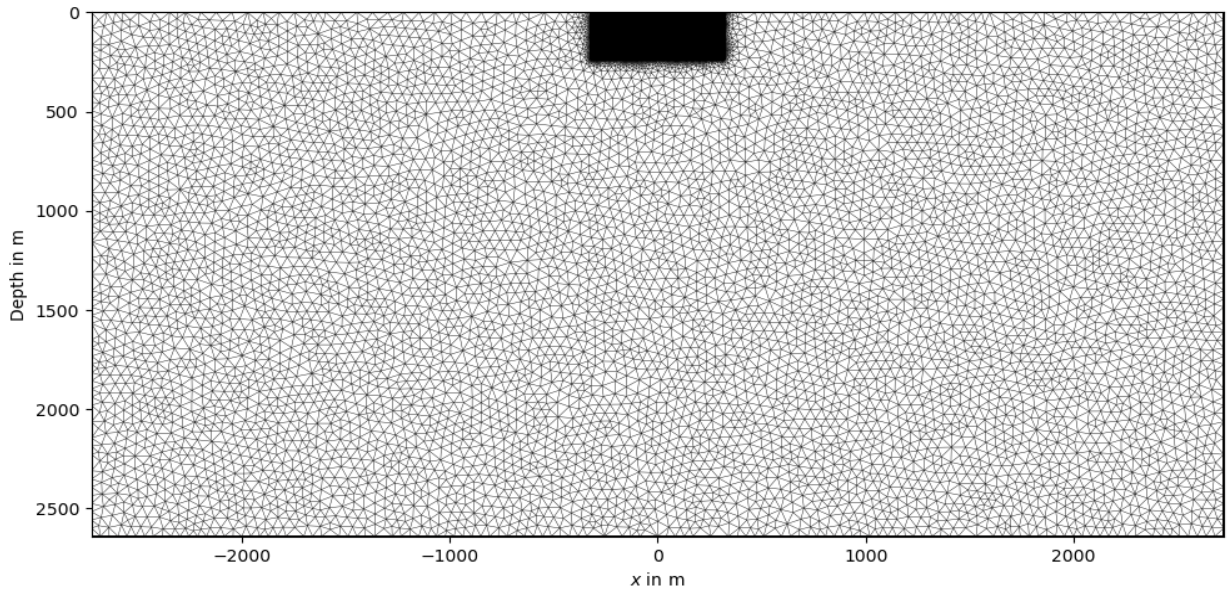


Figura 05: Malha para cálculo da tomografia elétrica. A área mais escura centrada em 0,0 m a 300,0 m reflete a real localização do experimento, enquanto a área restante da malha (300,0 m a ~3000,0 m, é para efeitos matemáticos de minimizar os efeitos de borda. Esta malha também é definida pela biblioteca, com base no espaçamento da seção elétrica e seu comprimento. É possível observar um comprimento muito maior que a área escura onde está a geometria de interesse da simulação.

A resistividade elétrica (ρ_r) em rochas é influenciada por fatores como a porosidade (ϕ), a saturação dos poros com fluidos (S) e a resistividade da solução aquosa (ρ_w). A lei de Archie fornece uma relação empírica que considera a tortuosidade (a) e os coeficientes de cimentação (m) e de saturação (n) para descrever o comportamento elétrico do espaço poroso (Quadro 05).

Quadro 5: Lei de Archie, que relaciona a porosidade, saturação da água, tortuosidade e condutividade elétrica.

$$\rho_{r\ fl} = a\rho_w\phi^{-m}S^{-n}$$

4. RESULTADOS

Com a expectativa de atingir resultados extraordinários como o de Pollock & Círpka (2012) apresentado na figura 06. Uma simulação elétrica a partir do modelo de dispersão atingido, foi realizada, porém, sem o sucesso de inversão dos dados, provavelmente devido ao poder computacional de

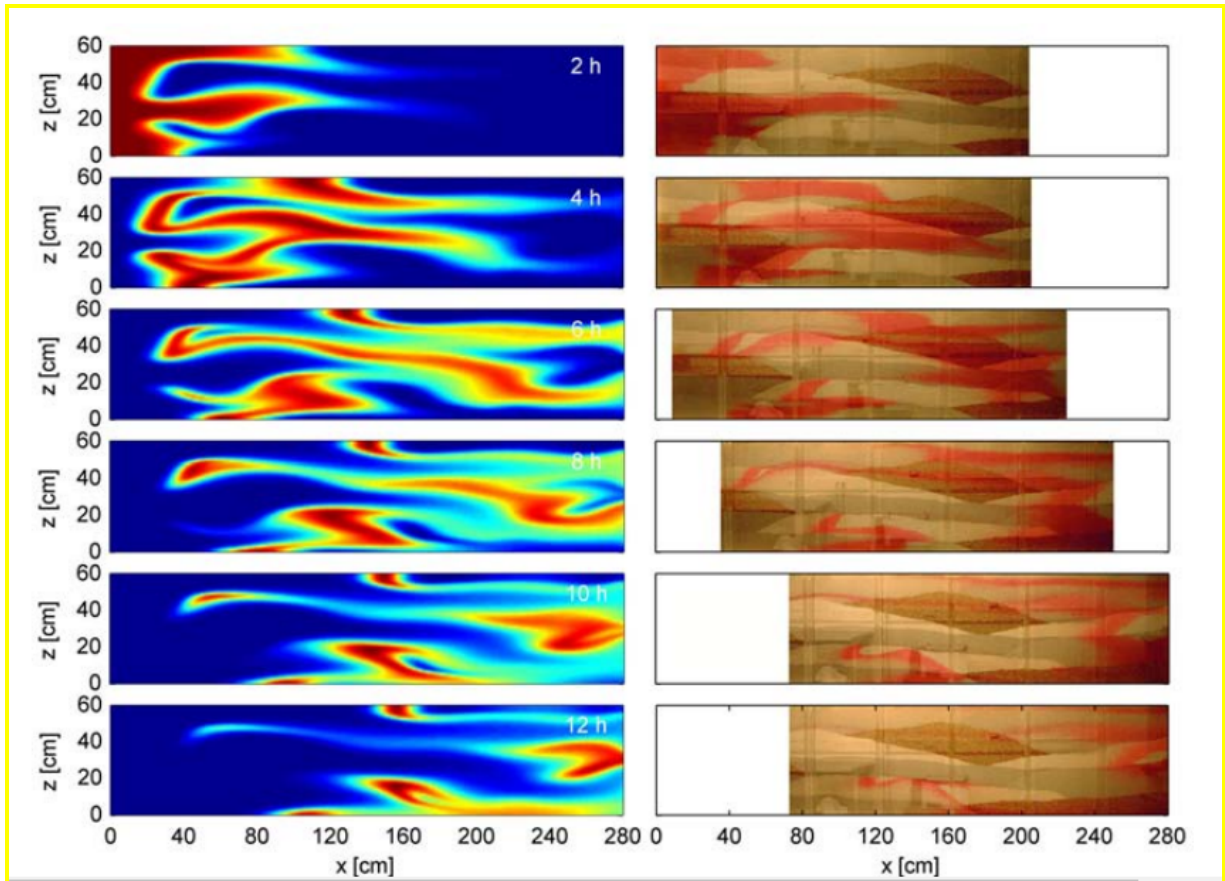


Figura 06: Comparação entre a simulação numérica do caminho percorrido pelo fluxo com um período de 2h, e a movimentação experimental realizada em uma caixa de areia.

Fonte: Pollock & Cirkpa (2012)

Os resultados obtidos são modelos de tomogramas de resistividade elétrica, calculados pela configuração da posição da pluma no instante de tempo discretizado. O tempo total de obtenção da simulação elétrica é de 30 minutos e de cada tomograma é de 30 segundos para um computador de uso pessoal (Figura 07).

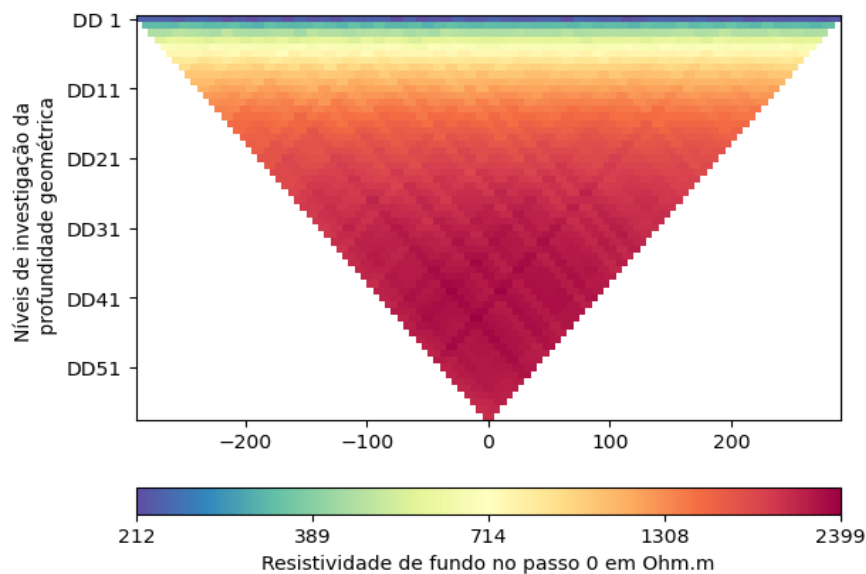


Figura 07: Gráficos gerados após a simulação ERT com base nos dados de concentração salina em um determinado passo de tempo. Tempo de resolução da simulação para os parâmetros definidos em torno de 30min.

Processos de redução do sinal resistivo (subtração e normalização dos tomogramas pós-injeção pelo tomograma pré-injeção) foram realizados nos tomogramas conforme realizado por (Pollock & Cirkpa, 2012), pois as anomalias não ficaram evidentes na primeira resposta, a fim de realçar com maior contraste a resposta esperada pelo modelo.

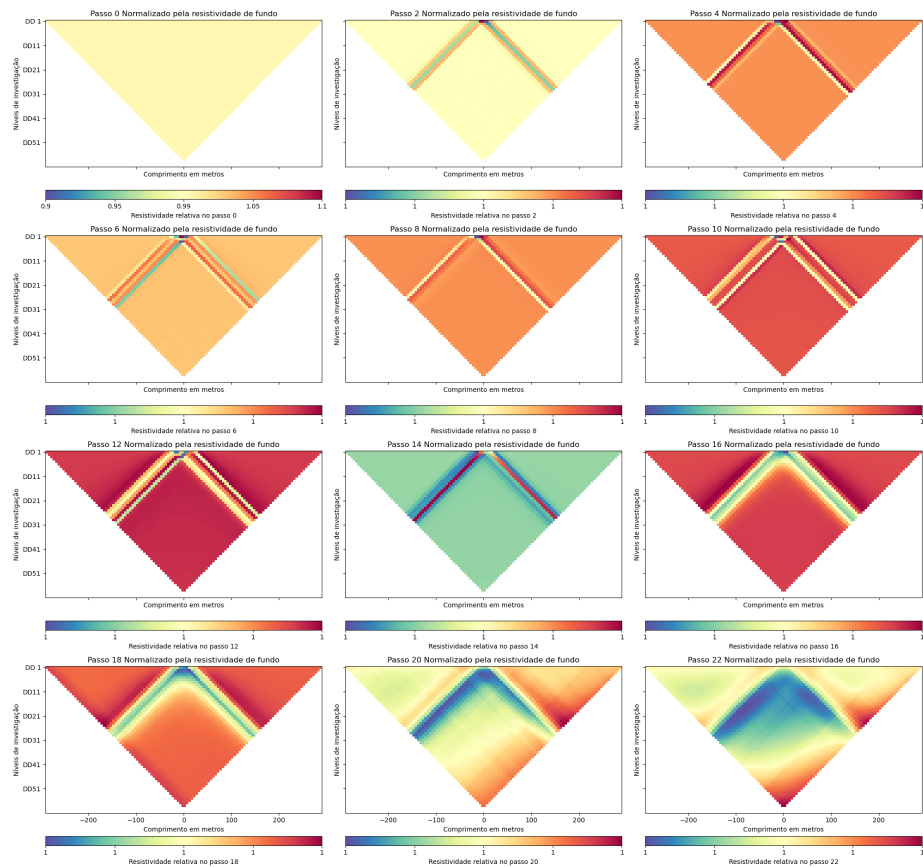


Figura 08: Anomalia em forma de “V” invertido causada pela movimentação da pluma salina e destacada com a normalização dos passos de tempo pela resistividade elétrica no passo zero (pré-injeção). É possível observar que a espessura de cada traço do “V”, se tornam mais espessas, e na última imagem, o efeito de condutividade inferior à posição da pluma, causado pela escolha do arranjo dipolo-dipolo. Ao avanço da pluma salina, os pontos de investigação de um mesmo eletrodo, o qual há uma preferência de caminho pela menor resistividade, percorrendo o mesmo caminho do traçador, obtêm valores muito baixos de resistividade, no caso do arranjo dipolo dipolo, é representada por listras diagonais ocasionando zonas aparentemente mais resistivas nas outras regiões devida a essa “fuga de corrente”. Obs.: resistividade elétrica relativa adimensional.

5. DISCUSSÕES

A partir da análise dos resultados é possível constatar que é válida a aplicabilidade da simulação 2D de um ensaio de traçador acoplado a uma investigação com tomografia elétrica. A implementação da simulação permitiu avaliar cenários compatíveis com uma situação real reproduzida no modelo, considerar a contribuição de alguns parâmetros, em especial o tamanho das geometrias e a forte influência da condutividade hidráulica dos meios.

A condutividade hidráulica, influencia diretamente nas implicações da velocidade, podendo tornar-se mais vertical ou horizontal a depender do contraste das camadas. A posição e forma do poço implicam no valor numérico da velocidade e na difusão concentrada ou esparsa. O espaçamento dos eletrodos, na visibilidade espacial da pluma. O tamanho das células e qualidade da malha, contribuem para o tempo de processamento

A estimação computacional da dispersão da pluma acoplada à tomografia elétrica é eficaz para descrever a evolução da pluma e suas consequências. Por meio do uso da inversão direta do experimento com acoplamento da simulação, é possível mapear as diferenças de condutividade hidráulica e melhorar a estimativa da distribuição de valores nas camadas. Toda essa análise é possível, pois o comportamento dos parâmetros caracterizam o fluxo no domínio poroso, além da modelagem se tornar estável o suficiente para o modelo computacional resolver, de maneira fiel, a estimativa dos parâmetros.

A simulação seria comprovada como sucedida com a execução completa da etapa de inversão do modelo, pois a própria inversão retornaria uma matriz erro, e com um resultado que criaria o mesmo padrão de resposta de resistividade elétrica.

Com a comparação e execução de modelagem direta com os dados de campo, é esperada a comprovação da eficiência da simulação. Havendo também, devido às múltiplas soluções, uma possibilidade de representar outro modelo não condizente com o real, a qual o conhecimento geológico, físico e matemático é de grande valia para considerar mais esta solução como inválida para a representação do modelo.

Uma das limitações encontradas diz respeito à consideração de inserir fronteiras e geometrias mais elaboradas (como dobras e falhas, ou taxas relacionadas) ocasionando o provável aumento do tempo de implementação (para o caso não dominar matemática avançada de EDPs e de taxas relacionadas) e configuração do código, pois para cada nova consideração, cada parcela do código ainda precisa de uma adaptação para manter o funcionamento do código. Além disso, a capacidade de processamento utilizada e o tempo disponível para implementar, não permitiu trabalhar com um modelo hidrogeológico mais complexo.

Outra dificuldade enfrentada foi que o processo de inversão ocupou todos os 24 GB de memória RAM disponível, forçando um arquivo de paginação maior, e eventualmente levando à suspensão dos processos em conjunto com travamentos do sistema operacional.

6. CONCLUSÃO

Face ao exposto, este artigo buscou avaliar de que forma uma simulação numérica de um acoplamento hidrogeológico com a tomografia elétrica pode ser condizente em um experimento real. Assim como descrito no conteúdo do texto, há evidências que sim, uma simulação numérica pode representar a resposta hidrogeológica e elétrica em diferentes condições geométricas do solo e propriedades hidrogeológicas diversas. Com os resultados gráficos e numéricos gerados durante o processo, salvo que a precisão da modelagem depende significativamente da qualidade da discretização, da representatividade do modelo e da delimitação dos parâmetros, assim como mencionado por diversos autores.

Conforme as referências, a capacidade de discretizar alvos com a profundidade, devido a limitações na tomografia elétrica de superfície, é melhorada exponencialmente, com o uso de tomografias entre poços. Na simulação, a visualização da correlação entre a saturação salina do solo e a resistividade elétrica, ainda que simplificada, permite readequar os parâmetros para aumentar a eficiência do ensaio experimental.

Os perfis de tomografia elétrica, com o uso de injeções salinas, amplificaram o contraste de condutividade e resistividade, permitindo uma melhor resolução de eventuais estruturas geológicas. Apesar da profundidade numérica não ser representativa da profundidade real, algumas simulações, onde o distanciamento dos eletrodos é menor, implica na melhor caracterização das plumas, porém com a profundidade limitada.

A introdução de um traçador mais salino e o aumento do gradiente hidráulico através do comprimento dos poços injetores, durante as simulações, permitiu maior

penetrabilidade vertical da pluma, implicando em melhor potencial de evidenciar estruturas profundas.

Analisando as correlações, para simulações futuras, com a introdução de dobras e fraturas nos modelos, em concordância com os afloramentos geológicos da área, é esperada uma melhora na representatividade do modelo. Outras simulações, com ênfase na mudança dos arranjos elétricos, também podem ser de grande utilidade, ao confirmar que o arranjo dipolo dipolo, é o mais indicado para esse tipo de investigação, assim como a dominância de seu uso nos artigos revisados.

Para as modelagens, o contraste maior de condutividades e uma maior profundidade dos poços, proporcionaram melhor representação de feições mais profundas. A combinação de tomografia elétrica com métodos sísmicos e eletromagnéticos é bastante utilizada pela academia para pesquisas similares, O uso de georadar foi dispensado devido à baixa penetrabilidade evidenciadas em outras pesquisas realizadas na área/região. A combinação de métodos poderá ser benéfica na assertividade da profundidade das feições, pois, devido à condutividade induzida, a profundidade de investigação também poderá ser reduzida devido à convergência das linhas equipotenciais.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Archie, G. E. (1942). *The Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining Some Reservoir Characteristics*.
- Camporese, M., Cassiani, G., Deiana, R., & Salandin, P. (2011). Assessment of local hydraulic properties from electrical resistivity tomography monitoring of a three-dimensional synthetic tracer test experiment. *Water Resources Research*, 47(12). <https://doi.org/10.1029/2011wr010528>
- Camporese, M., Cassiani, G., Deiana, R., Salandin, P., & Binley, A. (2015). Coupled and uncoupled hydrogeophysical inversions using ensemble Kalman filter assimilation of ERT-monitored tracer test data. *Water Resources Research*, 51(5), 3277–3291. <https://doi.org/10.1002/2014WR016017>
- Cassiani, G., Bruno, V., Villa, A., Fusi, N., & Binley, A. M. (2006). A saline trace test monitored via time-lapse surface electrical resistivity tomography. *Journal of Applied Geophysics*, 59(3), 244–259. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2005.10.007>
- Crestani, E., Camporese, M., & Salandin, P. (2015). Assessment of hydraulic conductivity distributions through assimilation of travel time data from ERT-monitored tracer tests. *Advances in Water Resources*, 84, 23–36. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2015.07.022>
- Deiana, R., Cassiani, G., Kemna, A., Villa, A., Bruno, V., & Bagliani, A. (2007). An experiment of non-invasive characterization of the vadose zone via water injection and cross-hole time-lapse

geophysical monitoring. *Near Surface Geophysics*, 5(3), 183–194.
<https://doi.org/10.3997/1873-0604.2006030>

- Deiana, R., Cassiani, G., Villa, A., Bagliani, A., & Bruno, V. (2008). Calibration of a Vadose Zone Model Using Water Injection Monitored by GPR and Electrical Resistance Tomography. *Vadose Zone Journal*, 7(1), 215–226. <https://doi.org/10.2136/vzj2006.0137>
- Günther, T., C. Rücker, and K. Spitzer, 2006, Three-dimensional modelling and inversion of DC resistivity data incorporating topography — II. Inversion: *Geophysical Journal International*, 166, 506–517.
- IBGE. (2019). Biomas e sistema costeiro-marinho do Brasil : compatível com a escala 1:250 000.
- Kim, J. G., Park, S. G., Yi, M. J., & Kim, J. H. (2010). Tracing solute infiltration using a combined method of dye tracer test and electrical resistivity tomography in an undisturbed forest soil profile. *Hydrological Processes*, 24(21), 2977–2982. <https://doi.org/10.1002/hyp.7711>
- Monego, M., Cassiani, G., Deiana, R., Putti, M., Passadore, G., & Altissimo, L. (2010). A tracer test in a shallow heterogeneous aquifer monitored via time-lapse surface electrical resistivity tomography. *Geophysics*, 75(4). <https://doi.org/10.1190/1.3474601>
- Muller, K., Vanderborght, J., Englert, A., Kemna, A., Huisman, J. A., Rings, J., & Vereecken, H. (2010). Imaging and characterization of solute transport during two tracer tests in a shallow aquifer using electrical resistivity tomography and multilevel groundwater samplers. *Water Resources Research*, 46(3). <https://doi.org/10.1029/2008WR007595>
- National Research Council Committee on Basic Research Opportunities in the Earth Sciences. (2001). *National Research Council Committee on Basic Research Opportunities in the Earth Sciences* (Vol. 01).
- Overbeck, G. E., Vélez-Martin, E., Menezes, L. da S., Anand, M., Baeza, S., Carlucci, M. B., Dechoum, M. S., Durigan, G., Fidelis, A., Guido, A., Moro, M. F., Munhoz, C. B. R., Reginato, M., Rodrigues, R. S., Rosenfield, M. F., Sampaio, A. B., Barbosa da Silva, F. H., Silveira, F. A. O., Sosinski, Ê. E., ... Müller, S. C. (2022). Placing Brazil's grasslands and savannas on the map of science and conservation. In *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics* (Vol. 56). Elsevier GmbH. <https://doi.org/10.1016/j.ppees.2022.125687>
- Perri, M. T., Barone, I., Cassiani, G., Deiana, R., & Binley, A. (2020). Borehole effect causing artefacts in cross-borehole electrical resistivity tomography: A hydraulic fracturing case study. *Near Surface Geophysics*, 18(4), 445–462. <https://doi.org/10.1002/nsg.12111>

- Perri, M. T., Cassiani, G., Gervasio, I., Deiana, R., & Binley, A. (2012). A saline tracer test monitored via both surface and cross-borehole electrical resistivity tomography: Comparison of time-lapse results. *Journal of Applied Geophysics*, 79, 6–16. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2011.12.011>
- Perri, M. T., De Vita, P., Masciale, R., Portoghese, I., Chirico, G. B., & Cassiani, G. (2018). Time-lapse Mise-à-la-Masse measurements and modeling for tracer test monitoring in a shallow aquifer. *Journal of Hydrology*, 561, 461–477. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.11.013>
- Pollock, D., & Cirpka, O. A. (2008). Temporal moments in geoelectrical monitoring of salt tracer experiments. *Water Resources Research*, 44(12). <https://doi.org/10.1029/2008WR007014>
- Pollock, D., & Cirpka, O. A. (2010). Fully coupled hydrogeophysical inversion of synthetic salt tracer experiments. *Water Resources Research*, 46(7). <https://doi.org/10.1029/2009wr008575>
- Pollock, D., & Cirpka, O. A. (2012). Fully coupled hydrogeophysical inversion of a laboratory salt tracer experiment monitored by electrical resistivity tomography. *Water Resources Research*, 48(1). <https://doi.org/10.1029/2011WR010779>
- Robinson, J., Slater, L., Johnson, T., Shapiro, A., Tiedeman, C., Ntarlagiannis, D., Johnson, C., Day-Lewis, F., Lacombe, P., Imbrigiotta, T., & Lane, J. (2016). Imaging Pathways in Fractured Rock Using Three-Dimensional Electrical Resistivity Tomography. *Groundwater*, 54(2), 186–201. <https://doi.org/10.1111/gwat.12356>
- Rücker, C., Günther, T., & Wagner, F. (2017). pyGIMLi: An open-source library for modelling and inversion in geophysics. *Computers & Geosciences*, 109, 106–123. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2017.07.011>
- Rücker, C., Günther, T., & Wagner, F. (2018). BERT [Software]. <http://resistivity.net/bert/>
- Singha, K., & Gorelick, S. M. (2005). Saline tracer visualized with three-dimensional electrical resistivity tomography: Field-scale spatial moment analysis. *Water Resources Research*, 41(5), 1–17. <https://doi.org/10.1029/2004WR003460>
- Slater, L., Binley, A., Daily, W., & Johnson, R. (2000). Cross-hole electrical imaging of a controlled saline tracer injection. In *Journal of Applied Geophysics* (Vol. 44). www.elsevier.nl/locate/jappgeo
- Sreeparvathy, V., Kambhammettu, B. V. N. P., Peddinti, S. R., & Sarada, P. S. L. (2018). Application of ERT, Saline Tracer and Numerical Studies to Delineate Preferential Paths in Fractured Granites. *Ground Water*, 57(1), 126–139. <https://doi.org/10.1111/gwat.12663>

- Vanderborght, J., Kemna, A., Hardelauf, H., & Vereecken, H. (2005). Potential of electrical resistivity tomography to infer aquifer transport characteristics from tracer studies: A synthetic case study. *Water Resources Research*, 41(6), 1–23. <https://doi.org/10.1029/2004WR003774>
- Wagner, F. M., Rücker, C., & Günther, T. (2017). Reproducible Hydrogeophysical Inversions through the Open-Source Library pyGIMLi. *AGU FM*, 2017.
- Zouhri, L., & Lutz, P. (2010). A comparison of peak and plate electrodes in electrical resistivity tomography: Application to the chalky groundwater of the Beauvais aquifer (northern part of the Paris basin, France). *Hydrological Processes*, 24(21), 3040–3052. <https://doi.org/10.1002/hyp.7719>

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em conclusão, a revisão sistemática realizada com os artigos mais citados sobre tomografia elétrica e traçadores salinos, foi possível identificar resultados e modelos que suportam que há aplicabilidade de simulação 2D de um ensaio de traçador salino acoplado à tomografia elétrica para determinação de parâmetros hidrodinâmicos de um aquífero.

A execução bem-sucedida de vários experimentos, incluindo aqueles focados na propagação de contaminantes, monitoramento de aquíferos, investigações de barragens e estudos de movimentação de massa, destacam a aplicabilidade prática desta técnica. A integração de simulações e modelagem não somente aprimora a base de evidências para investigações, mas também otimiza os resultados, levando a reduções significativas de custos na aquisição de dados.

Entre os modelos de comportamento de fluidos, destaca-se a preferência pelo modelo simplificado de advecção-dispersão em relação à equação de Richards e aos modelos de transporte de contaminantes, relação esta, muito provável devido ao ganho não muito significativo para a complexidade matemática adicionada, sugerindo uma direção potencial para o modelo quando a precisão não é a componente mais importante da simulação. Além disso, a aplicação de técnicas de inversão acoplada e modelagem direta de dados de traçadores com tomografia elétrica tem se mostrado eficaz em experimentos de laboratório, a qual também indica caminhos promissores para pesquisas futuras. Houve também, em alguns modelos, a incorporação de métodos estocásticos para representar a heterogeneidade geológica e o comportamento dos fluidos, bem como o uso de vários traçadores para melhorar a precisão dos resultados, destacando a complexidade da dinâmica dos fluidos subterrâneos.

Este estudo ao implementar *scripts* em Python para simulação de um modelo experimental similar a um modelo real com a visualização da pluma através da tomografia sintética, confirma a viabilidade da implementação numérica de técnicas de simulação acoplada, com tempos de processamento razoáveis, dependendo da complexidade do modelo e das capacidades de hardware. A integração de dados geológicos e delimitações iterativas com fatores empíricos para representar a heterogeneidade na simulação numérica, proporcionaram uma compreensão mais profunda dos processos que governam o comportamento dos fluidos subterrâneos, permitindo previsões mais precisas e eficazes. A análise contínua desses dados não somente aprimora a modelagem, mas também facilita a identificação de padrões e anomalias que podem ser cruciais para aplicações em geologia, engenharia ambiental e recursos hídricos.

Essas descobertas validam a configuração e a implementação de simulações para experimentos futuros, particularmente em cenários mais complexos que o habitual, ao envolver interações fluido-rocha e fluido-vegetação. Pesquisas futuras podem ter como objetivo refinar esses modelos ou mesmo explorar suas aplicações em situações críticas como crises hídricas e propagação de contaminantes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Archie, G. E. (1942). The Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining Some Reservoir Characteristics. <http://onepetro.org/TRANS/article-pdf/146/01/54/2179020/spe-942054-g.pdf/1>
- Binley, A., Cassiani, G., Middleton, R., & Winship, P. (2002). Vadose zone flow model parameterisation using cross-borehole radar and resistivity imaging. *Journal of Hydrology*, 147–159.
- Camporese, M., Cassiani, G., Deiana, R., & Salandin, P. (2011). Assessment of local hydraulic properties from electrical resistivity tomography monitoring of a three-dimensional synthetic tracer test experiment. *Water Resources Research*, 47(12). <https://doi.org/10.1029/2011WR010528>
- Camporese, M., Cassiani, G., Deiana, R., Salandin, P., & Binley, A. (2015). Coupled and uncoupled hydrogeophysical inversions using ensemble Kalman filter assimilation of ERT-monitored tracer test data. *Water Resources Research*, 51(5), 3277–3291. <https://doi.org/10.1002/2014WR016017>
- Cassiani, G., Bruno, V., Villa, A., Fusi, N., & Binley, A. M. (2006). A saline trace test monitored via time-lapse surface electrical resistivity tomography. *Journal of Applied Geophysics*, 59(3), 244–259. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2005.10.007>
- Castro, K., & Cunha, L. (2021). Pesquisas forenses e a identificação de vestígios humanos com o Radar de Penetração do Solo (GPR).
- Crestani, E., Camporese, M., & Salandin, P. (2015). Assessment of hydraulic conductivity distributions through assimilation of travel time data from ERT-monitored tracer tests. *Advances in Water Resources*, 84, 23–36. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2015.07.022>
- Deiana, R., Cassiani, G., Kemna, A., Villa, A., Bruno, V., & Bagliani, A. (2007). An experiment of non-invasive characterization of the vadose zone via water injection and cross-hole time-lapse geophysical monitoring. *Near Surface Geophysics*, 5(3), 183–194. <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2006030>
- Deiana, R., Cassiani, G., Villa, A., Bagliani, A., & Bruno, V. (2008). Calibration of a Vadose Zone Model Using Water Injection Monitored by GPR and Electrical Resistance Tomography. *Vadose Zone Journal*, 7(1), 215–226. <https://doi.org/10.2136/vzj2006.0137>

- Epting, J., Romanov, D., Huggenberger, P., & Kaufmann, G. (2009). Hydrology and Earth System Sciences Integrating field and numerical modeling methods for applied urban karst hydrogeology. In *Hydrol. Earth Syst. Sci* (Vol. 13). www.hydrol-earth-syst-sci.net/13/1163/2009/
- Ganz, C., Bachmann, J., Noell, U., Duijnisveld, W. H. M., & Lamparter, A. (2014). Hydraulic Modeling and in situ Electrical Resistivity Tomography to Analyze Ponded Infiltration into a Water Repellent Sand. *Vadose Zone Journal*, 13(1), 1–14. <https://doi.org/10.2136/vzj2013.04.0074>
- Günther, T., C. Rücker, and K. Spitzer, 2006, Three-dimensional modelling and inversion of DC resistivity data incorporating topography — II. Inversion: *Geophysical Journal International*, 166, 506–517.
- Guo, T. R., Tong, L. T., Chiang, L. W., & Yang, C. H. (2011). A fracture study by using bipole-bipole cross-well logging. *Journal of Applied Geophysics*, 75(2), 203–210. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2011.07.012>
- Hung, Y. C., Chen, T. T., Tsai, T. F., & Chen, H. X. (2021). A comprehensive investigation on abnormal impoundment of reservoirs—a case study of qionglin reservoir in Kinmen Island. *Water (Switzerland)*, 13(11). <https://doi.org/10.3390/w13111463>
- IBGE. (2019). *Biomass e sistema costeiro-marinho do Brasil : compatível com a escala 1:250 000*.
- Kemna, A., Vanderborght, J., Kulesa, B., & Vereecken, H. (2002). Imaging and characterisation of subsurface solute transport using electrical resistivity tomography (ERT) and equivalent transport models. *Journal of Hydrology*, 1, 125–146.
- Kim, J. G., Park, S. G., Yi, M. J., & Kim, J. H. (2010). Tracing solute infiltration using a combined method of dye tracer test and electrical resistivity tomography in an undisturbed forest soil profile. *Hydrological Processes*, 24(21), 2977–2982. <https://doi.org/10.1002/hyp.7711>
- Kuras, O., Pritchard, J. D., Meldrum, P. I., Chambers, J. E., Wilkinson, P. B., Ogilvy, R. D., & Wealthall, G. P. (2009). Monitoring hydraulic processes with automated time-lapse electrical resistivity tomography (ALERT). *Comptes Rendus - Geoscience*, 341(10–11), 868–885. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2009.07.010>
- Lekmine, G., Pessel, M., & Auradou, H. (2012). Experimental Study of ERT Monitoring Ability to Measure Solute Dispersion. *Ground Water*, 50(2), 285–295. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2011.00837.x>

- Lv, H., Ling, C., Hu, B. X., Ran, J., Zheng, Y., Xu, Q., & Tong, J. (2019). Characterizing groundwater flow in a translational rock landslide of southwestern China. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78(3), 1989–2007. <https://doi.org/10.1007/s10064-017-1212-3>
- Martel, R., Castellazzi, P., Gloaguen, E., Trépanier, L., & Garfias, J. (2018). ERT, GPR, InSAR, and tracer tests to characterize karst aquifer systems under urban areas: The case of Quebec City. *Geomorphology*, 310, 45–56. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.03.003>
- Monego, M., Cassiani, G., Deiana, R., Putti, M., Passadore, G., & Altissimo, L. (2010). A tracer test in a shallow heterogeneous aquifer monitored via time-lapse surface electrical resistivity tomography. *Geophysics*, 75(4). <https://doi.org/10.1190/1.3474601>
- Muller, K., Vanderborght, J., Englert, A., Kemna, A., Huisman, J. A., Rings, J., & Vereecken, H. (2010). Imaging and characterization of solute transport during two tracer tests in a shallow aquifer using electrical resistivity tomography and multilevel groundwater samplers. *Water Resources Research*, 46(3). <https://doi.org/10.1029/2008WR007595>
- National Research Council Committee on Basic Research Opportunities in the Earth Sciences. (2001). National Research Council Committee on Basic Research Opportunities in the Earth Sciences.
- Overbeck, G. E., Vélez-Martin, E., Menezes, L. da S., Anand, M., Baeza, S., Carlucci, M. B., Dechoum, M. S., Durigan, G., Fidelis, A., Guido, A., Moro, M. F., Munhoz, C. B. R., Reginato, M., Rodrigues, R. S., Rosenfield, M. F., Sampaio, A. B., Barbosa da Silva, F. H., Silveira, F. A. O., Sosinski, Ê. E., ... Müller, S. C. (2022). Placing Brazil's grasslands and savannas on the map of science and conservation. In *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics* (Vol. 56). Elsevier GmbH. <https://doi.org/10.1016/j.ppees.2022.125687>
- Perri, M. T., Barone, I., Cassiani, G., Deiana, R., & Binley, A. (2020). Borehole effect causing artefacts in cross-borehole electrical resistivity tomography: A hydraulic fracturing case study. *Near Surface Geophysics*, 18(4), 445–462. <https://doi.org/10.1002/nsg.12111>
- Perri, M. T., Cassiani, G., Gervasio, I., Deiana, R., & Binley, A. (2012). A saline tracer test monitored via both surface and cross-borehole electrical resistivity tomography: Comparison of time-lapse results. *Journal of Applied Geophysics*, 79, 6–16. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2011.12.011>
- Perri, M. T., De Vita, P., Masciale, R., Portoghese, I., Chirico, G. B., & Cassiani, G. (2018). Time-lapse Mise-à-la-Masse measurements and modeling for tracer test monitoring in a shallow aquifer. *Journal of Hydrology*, 561, 461–477. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.11.013>

- Pollock, D., & Cirpka, O. A. (2008). Temporal moments in geoelectrical monitoring of salt tracer experiments. *Water Resources Research*, 44(12). <https://doi.org/10.1029/2008WR007014>
- Pollock, D., & Cirpka, O. A. (2010). Fully coupled hydrogeophysical inversion of synthetic salt tracer experiments. *Water Resources Research*, 46(7). <https://doi.org/10.1029/2009WR008575>
- Pollock, D., & Cirpka, O. A. (2012). Fully coupled hydrogeophysical inversion of a laboratory salt tracer experiment monitored by electrical resistivity tomography. *Water Resources Research*, 48(1). <https://doi.org/10.1029/2011WR010779>
- Porritt, K., Gomersall, J., & Lockwood, C. (2014). *SYSTEMATIC REVIEWS, Step by Step Study Selection and Critical Appraisal* (Vol. 114, Issue 6).
- Rasul, H., Earon, R., & Olofsson, B. (2018). Detecting Seasonal Flow Pathways in Road Structures Using Tracer Tests and ERT. *Water, Air, and Soil Pollution*, 229(11). <https://doi.org/10.1007/s11270-018-4008-6>
- Robert, T., Caterina, D., Deceuster, J., Kaufmann, O., & Nguyen, F. (2012). A salt tracer test monitored with surface ERT to detect preferential flow and transport paths in fractured/karstified limestones. *Geophysics*, 77(2). <https://doi.org/10.1190/geo2011-0313.1>
- Robert, T., Paulus, C., Bolly, P. Y., Lin, E. K. S., & Hermans, T. (2019). Heat as a proxy to image dynamic processes with 4D electrical resistivity tomography. *Geosciences (Switzerland)*, 9(10). <https://doi.org/10.3390/geosciences9100414>
- Robinson, J., Slater, L., Johnson, T., Shapiro, A., Tiedeman, C., Ntarlagiannis, D., Johnson, C., Day-Lewis, F., Lacombe, P., Imbrigiotta, T., & Lane, J. (2016). Imaging Pathways in Fractured Rock Using Three-Dimensional Electrical Resistivity Tomography. *Groundwater*, 54(2), 186–201. <https://doi.org/10.1111/gwat.12356>
- Rücker, C., Günther, T., & Wagner, F. (2017). pyGIMLi: An open-source library for modelling and inversion in geophysics. *Computers & Geosciences*, 109, 106–123. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2017.07.011>
- Rücker, C., Günther, T., & Wagner, F. (2018). BERT. [Software] <http://resistivity.net/bert/>
- Singha, K., & Gorelick, S. M. (2005). Saline tracer visualized with three-dimensional electrical resistivity tomography: Field-scale spatial moment analysis. *Water Resources Research*, 41(5), 1–17. <https://doi.org/10.1029/2004WR003460>
- Slater, L., Binley, A., Daily, W., & Johnson, R. (2000). Cross-hole electrical imaging of a controlled saline tracer injection. In *Journal of Applied Geophysics* (Vol. 44).

- Slater, L., Binley, A., Versteeg, R., Cassiani, G., Birken, R., & Sandberg, S. (2002). A 3D ERT study of solute transport in a large experimental tank. In *Journal of Applied Geophysics* (Vol. 49).
- Soulsby, C., Bradford, J., Dick, J., McNamara, J. P., Geris, J., Lessels, J., Blumstock, M., & Tetzlaff, D. (2016). Using geophysical surveys to test tracer-based storage estimates in headwater catchments. *Hydrological Processes*, 30(23), 4434–4445. <https://doi.org/10.1002/hyp.10889>
- Sreeparvathy, V., Kambhammettu, B. V. N. P., Peddinti, S. R., & Sarada, P. S. L. (2018). Application of ERT, Saline Tracer and Numerical Studies to Delineate Preferential Paths in Fractured Granites. *Ground Water*, 57(1), 126–139. <https://doi.org/10.1111/gwat.12663>
- Vanderborght, J., Kemna, A., Hardelauf, H., & Vereecken, H. (2005). Potential of electrical resistivity tomography to infer aquifer transport characteristics from tracer studies: A synthetic case study. *Water Resources Research*, 41(6), 1–23. <https://doi.org/10.1029/2004WR003774>
- Vereecken, H., Kemna, A., Tillmann, A., Vanderborght, J., & Verweerd, A. (2010). Hydrogeophysical characterization of subsurface solute transport at the Krauthausen test site: experiments and numerical modelling.
- Wabo, E., Kagoshima, M., & Mann, R. (2004). BATCH STIRRED VESSEL MIXING EVALUATED BY VISUALIZED REACTIVE TRACERS AND ELECTRICAL TOMOGRAPHY.
- Waltman, L., van Eck, N. J., & Noyons, E. C. M. (2010). A unified approach to mapping and clustering of bibliometric networks. *Journal of Informetrics*, 4(4), 629–635. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2010.07.002>
- Wilkinson, P. B., Meldrum, P. I., Kuras, O., Chambers, J. E., Holyoake, S. J., & Ogilvy, R. D. (2010). High-resolution Electrical Resistivity Tomography monitoring of a tracer test in a confined aquifer. *Journal of Applied Geophysics*, 70(4), 268–276. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2009.08.001>
- Yang, Z., Deng, Y., Qian, J., Ding, R., & Ma, L. (2020). Characterizing temporal behavior of a thermal tracer in porous media by time-lapse electrical resistivity measurements. <https://doi.org/10.1007/s10040-021-02307-1/Published>
- Zakarewicz, G., Maciel, S. T. R., & da Cunha, L. S. (2024). Systematic literature review on seismic diffraction imaging. In *Earth-Science Reviews* (Vol. 254). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2024.104792>
- Wagner, F. M., Rücker, C., & Günther, T. (2017). Reproducible Hydrogeophysical Inversions through the Open-Source Library pyGIMLi. AGU FM, 2017.

Zouhri, L., & Lutz, P. (2010). A comparison of peak and plate electrodes in electrical resistivity tomography: Application to the chalky groundwater of the Beauvais aquifer (northern part of the Paris basin, France). *Hydrological Processes*, 24(21), 3040–3052.
<https://doi.org/10.1002/hyp.7719>